

# Dualité onde-corpuscule

## 1 Photons et ondes lumineuses (Rappels 1 °S)

Les phénomènes de diffraction et d'interférences de la lumière sont des manifestations de son comportement ondulatoire. Mais le fait que certains phénomènes (l'effet photoélectrique (voir cours 1S), l'interaction lumière-matière,...) ne puissent pas s'expliquer par un modèle ondulatoire, rend nécessaire l'existence d'un modèle corpusculaire pour la lumière.

La lumière se comporte tantôt comme une onde, tantôt comme un flux de particules : ce sont les conditions de l'expérience qui orientent son comportement. Pour désigner ce double comportement, on parle de dualité onde-corpuscule.

### Définition 15.1: Le photon

L'énergie de la lumière est transportée par des particules élémentaires, appelées *photons*. Le photon a :

- Une masse nulle
- Une charge électrique nulle
- Une vitesse dans le vide égale à  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
- Une taille nulle

**Définition 15.2: Relation de Planck-Einstein**

L'énergie est une grandeur qui décrit l'aspect corpusculaire du photon. La fréquence en décrit un aspect ondulatoire. Ces deux quantités sont reliées par la relation de Planck-Einstein :

$$E = h\nu$$

Où  $E$  est l'énergie du photon,  $\nu$  est la longueur d'onde de l'onde qui y est associée, et  $h = 6.67 \times 10^{-32}$  Js est la constante de Planck.

La relation de Planck-Einstein est une relation fondamentale en mécanique quantique, elle établit la correspondance entre les aspects corpusculaires et ondulatoires de la matière.

Dans le vide, l'onde associée au photon a une longueur d'onde  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , homogène à une longueur, si bien que l'on peut réécrire :

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Cette relation n'est vraie que pour le photon.

## 2 Particules matérielles et ondes de matière

### 2.1 Les relations de Louis de Broglie

En 1924, Louis De Broglie (prononcer "De Brœil"), propose de généraliser la dualité onde-particule, admise pour la lumière, aux particules matérielles, c'est-à-dire possédant une masse en leur associant une onde appelée *fonction d'onde*. Une particule matérielle est caractérisée dans son aspect corpusculaire par une énergie  $E$  et une impulsion  $p$ . Dans leur aspect ondulatoire, c'est la fréquence  $\nu$  et la longueur d'onde  $\lambda$  qui la caractérisent.

La relation de Planck-Einstein  $E = h\nu$  se voit complétée par la relation de de Broglie :

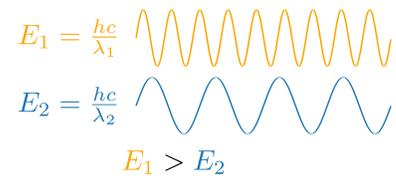


FIGURE 15.1: La relation de Planck-Einstein relie l'énergie de la particule à sa fréquence, elle-même reliée à la longueur d'onde pour les ondes lumineuses. Les ondes "molles" sont moins énergétiques que les ondes "dures", comme l'illustre cette figure.

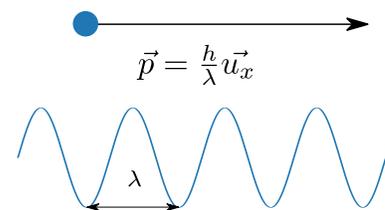


FIGURE 15.2: En mécanique quantique, on associe à une particule d'impulsion  $p$  une onde de longueur d'onde  $\lambda$ . Ces deux quantités sont reliées par la relation de de Broglie.

Attention, la relation  $E = \frac{hc}{\lambda}$ , valable pour le photon de masse nulle, ne l'est plus pour les particules de matière!

**Définition 15.3: Relation de de Broglie**

La relation de de Broglie lie l'impulsion d'un corpuscule à la longueur d'onde de sa fonction d'onde :

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

où  $p$  est la norme de l'impulsion de la particule,  $h$  est la constante de Planck, et  $\lambda$  la longueur d'onde de la fonction d'onde associée à la particule.

Pour une particule de masse  $m \neq 0$ , animée d'une vitesse très inférieure à la célérité de la lumière, l'impulsion  $\vec{p}$  s'écrit :

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Pour les particules relativistes, il faut faire appel à la relativité restreinte pour généraliser cette relation. Cela fera l'objet d'un cours ultérieur. Ceci lève la contradiction apparente lorsqu'on applique ces formules au photon!

**2.2 Manifestations expérimentales**

En 1927, la diffraction d'électrons par un cristal constitua la première expérience confirmatoire du comportement ondulatoire de la matière. Par la suite, de nombreuses expériences ont montré que les particules présentent un caractère ondulatoire, validant ainsi complètement l'hypothèse de De Broglie :

- La diffraction des neutrons (1946)
- Les interférences entre atomes d'hélium (Expérience de Carnal et Mlynek - 1991)
- Les interférences entre molécules de fullerène ( $C_{60}$ ) (1999).

Aujourd'hui, les ondes de matière sont utilisées afin de sonder la matière à l'échelle des atomes et des molécules, par exemples dans les microscopes électroniques.

ACTIVITÉ 1 : PARTICULES ET ONDES DE MATIÈRE

**3 Aspect probabiliste de la physique quantique**

ACTIVITÉ 2 : EXPÉRIENCES PHOTON PAR PHOTON

Les phénomènes quantiques présentent un aspect probabiliste. Par exemple, dans une expérience d'interférences photon par photon, on ne peut pas prévoir la position de l'impact d'un photon sur l'écran : seule sa probabilité de

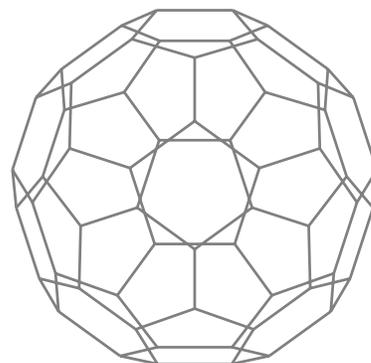


FIGURE 15.3: Au fil des ans, il a été possible d'observer des interférences entre objets de plus en plus gros. La molécule de fullerène  $C_{60}$  ci-dessus illustre remarquablement : un tel édifice est bien loin des particules élémentaires!

présence en un endroit donné est déterminée. Lorsque le nombre de photons est important, ils respectent une loi de probabilité dont le motif constitue les franges d'interférence. Les franges s'interprètent alors comme une alternance de zones où le photon a une probabilité de présence minimale ou maximale.

**À la fin de ce chapitre, je sais faire (extrait du B.O.) :**

- Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
- Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-corpuscule.
- Connaître et utiliser la relation  $p = \frac{h}{\lambda}$
- Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
- Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.