

# 1 Aspects ondulatoire et particulière de la lumière

La détermination de la nature de la lumière fut l'objet de nombreuses controverses durant l'histoire.

## 1.1 Comportement ondulatoire de la lumière

Dans son *Traité de la lumière*, Christian HUYGENS (1629-1695) décrit la diffraction et les interférences et interprète la lumière comme la propagation d'une onde. Deux siècles plus tard, James Clerk MAXWELL (1831-1879) introduit la théorie de la propagation des ondes électromagnétiques. La découverte des ondes électromagnétiques par Heinrich HERTZ (1857-1894) apporte la vérification expérimentale de la théorie ondulatoire de MAXWELL. La lumière devient alors un cas particulier d'ondes électromagnétiques, de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.

## Définition

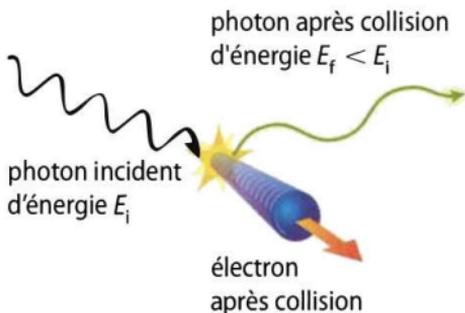
Les phénomènes de diffraction ou d'interférences sont des manifestations du *comportement* (1) *ondulatoire* (2) de la lumière.

## 1.2 Comportement particulaire de la lumière

Pour Isaac NEWTON (1643-1727), la lumière est composée de petites particules massiques et rapides. C'est une conception particulaire de la lumière.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, Albert EINSTEIN (1879-1955) propose le modèle du photon, qu'on peut considérer comme une particule transportant un quantum d'énergie.

L'effet COMPTON est une manifestation de ce comportement particulaire. Cette expérience est interprétée comme une collision, dite élastique (c'est-à-dire avec conservation de l'énergie), entre un photon et un électron.



Après la collision, le photon voit son énergie diminuer au profit de l'électron.

### Définition

Certains phénomènes, comme l'effet Compton, sont des manifestations du *comportement* (3) *particulaire* (4) de la lumière.

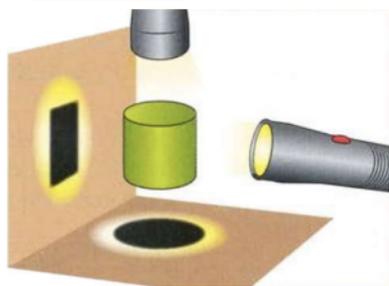
## 1.3 Dualité onde-particule de la lumière

Au cours de l'histoire, les physiciens ont donc interprété la nature de la lumière soit par son comportement ondulatoire, soit par son comportement particulaire. Pour autant, ces deux concepts isolés sont insuffisants pour décrire dans son ensemble la nature de la lumière.

### Définition

Les concepts classiques d'*onde* (5) et de *particule* (6) pris isolément sont insuffisants pour interpréter complètement la nature de la lumière.

### Remarque



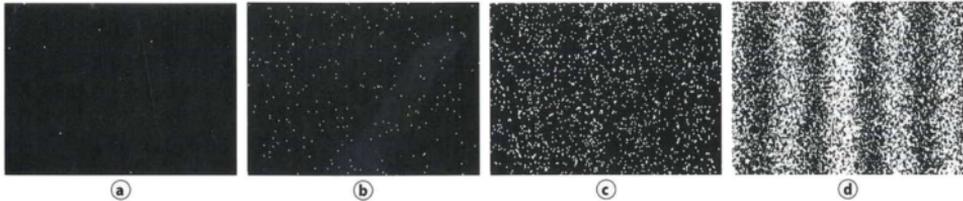
Suivant les conditions d'observation, l'ombre portée du cylindre est tantôt un disque, tantôt un rectangle. La nature du cylindre est pourtant différente de ces deux éléments pris isolément.

Métaphore du cylindre :

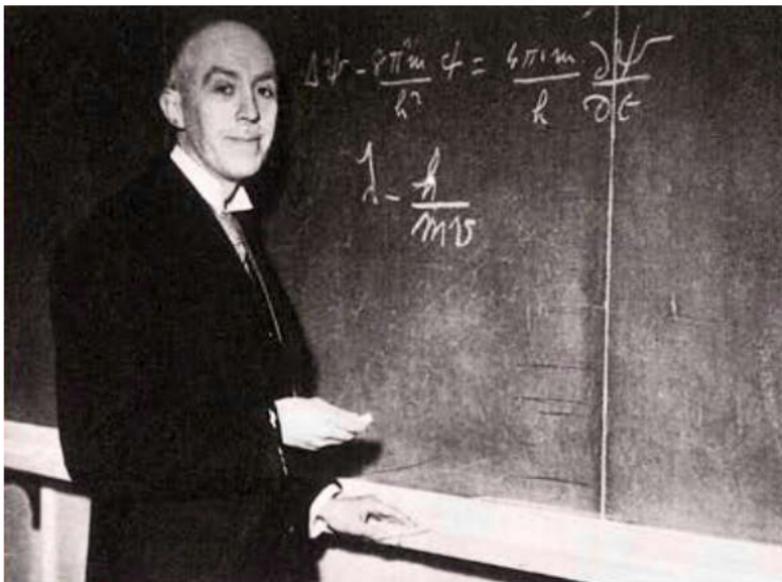
### Définition

La lumière se comporte tantôt comme une onde, tantôt comme une particule : ce sont les *conditions* (7) de l'expérience qui orientent son comportement. Pour désigner ce double comportement, on utilise l'expression de *dualité* (8) *onde-particule* (9).

## 2 Particules matérielles et ondes de matière



### 2.1 L'hypothèse de de Broglie



Dans sa thèse, publiée en 1924, Louis DE BROGLIE (1892-

1987) propose de généraliser la dualité onde-particule, admise pour la lumière, à tous les objets microscopiques : il émet ainsi l'hypothèse que ce double comportement est observable chez tous les objets microscopiques de la matière (électrons, protons, neutrons...).

Cette hypothèse est confirmée en 1927 par l'observation du phénomène de diffraction pour des électrons, en présence d'un obstacle ou d'une ouverture. Quelques années plus tard, le phénomène d'interférences d'électrons est observé (figure ci-dessus), validant ainsi complètement l'hypothèse de DE BROGLIE (prix Nobel de physique 1929).

### Définition

Les objets *micro* (10) de la matière (électrons, protons...) présentent, comme la lumière, un double aspect ondulatoire et particulaire.

## 2.2 La relation de de Broglie

Pour tenter d'unifier ce double comportement de la matière, DE BROGLIE introduit la notion d'onde de matière. La relation qui porte son nom permet de relier les deux concepts classiques d'onde et de particule.

### Définition

À chaque particule en mouvement est associée une onde (11) de matière de longueur d'onde  $\lambda$ , liée à la quantité de mouvement  $p$  de la particule par la relation de DE BROGLIE :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{avec} \quad h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$h$  constante de Planck (12);

$p$  quantité de mouvement (13) ( $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$\lambda$  longueur d'onde (14) de matière (m).

### Exemple

Soit un électron de masse  $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  se déplaçant à la vitesse  $v = 400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Calculer la longueur d'onde de matière  $\lambda$ .

La quantité de mouvement de l'électron est  $p = m_e v$ ; la longueur d'onde est donnée par :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 400} = 1,82 \text{ }\mu\text{m}$$

### Remarque

La **longueur d'onde** fait référence à un comportement ondulatoire.

La **quantité de mouvement** fait référence au comportement particulaire avec un transport de matière.

## 2.3 Conditions d'observation du comportement ondulatoire

Les phénomènes de diffraction ou d'interférences, liés à la présence d'un obstacle ou d'une ouverture, sont des manifestations du comportement ondulatoire d'objets microscopiques.

### Définition

Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la dimension  $a$  de l'obstacle ou de l'ouverture est *du même (15) ordre*

(16) de grandeur (17) que la longueur d'onde de matière  $\lambda$ .

La constante de Planck  $h$  étant extrêmement faible, les objets de notre quotidien ont un comportement ondulatoire indécélable.

### Exemple

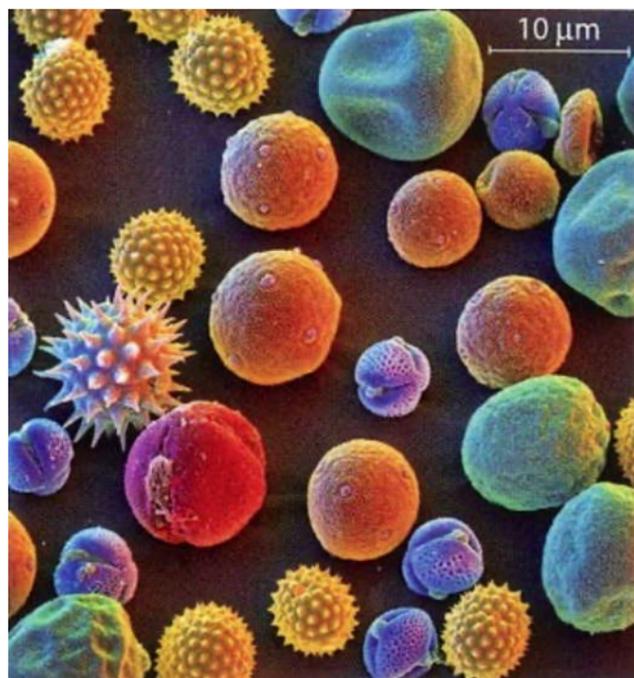
Le jour du retour au lycée, les élèves (de masse moyenne  $m_e = 60$  kg) qui passent par l'entrée 1899 du lycée (largeur  $a = 5,0$  m) avec une vitesse de  $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  n'auront pas de comportement ondulatoire et ne seront pas diffractés. Justifier.

Longueur d'onde de matière associée aux élèves :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{60 \times 2,0} = 5,5 \times 10^{-36} \text{ m}$$

$\lambda \ll a$ , la diffraction est négligeable.

## Remarque



Le caractère ondulatoire des électrons peut être mis à profil dans un microscope électronique. Ci-dessus, une image de grains de pollen observés au microscope électronique.

# 3 Aspect probabiliste des phénomènes quantiques

## 3.1 Phénomènes quantiques

Les *phénomène* (18) *quantique* (19) sont les phénomènes où interviennent des objets microscopiques de la matière (électrons, protons...) et qui ne s'expliquent pas par les lois classiques de la physique.

### Remarque

La dualité onde-particule est un **phénomène quantique**.

Dans le cas de la figure d'interférences obtenue avec un faisceau d'électrons et deux fentes étroites et rapprochées, appelées fentes (ou bifente) de YOUNG (enregistrement précédent), la position de l'impact sur l'écran ne permet pas de déterminer la trajectoire des électrons. Les électrons semblent passer par les deux fentes en même temps, ce qui n'a aucun sens.

Dans l'étude des phénomènes quantiques, la notion de *trajectoire* (20) n'est plus pertinente. On ne peut pas déterminer la trajectoire d'une particule qui manifeste

un comportement ondulatoire.

## 3.2 Comportement aléatoire

L'enregistrement précédent illustre les interférences particule par particule obtenues avec des électrons traversant des fentes de YOUNG. La distribution spatiale des impacts des électrons sur l'écran semble *chaotique* (21) pour un faible nombre d'électrons (8 à 2000).

Pour un nombre important d'entre eux (6000 électrons), la distribution est ordonnée : on observe d'une part des zones où le nombre d'impacts est important, d'autre part des zones avec très peu d'impacts. Cette distribution ordonnée des impacts peut s'interpréter par un comportement *aléatoire* (22) de la particule de matière.

### Remarque

Un système qui a un comportement **chaotique** est imprévisible.

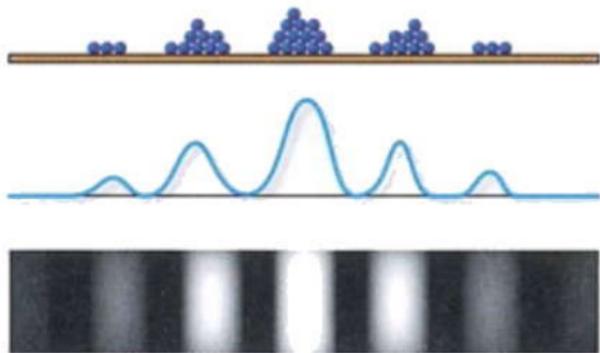
Un système qui a un comportement **aléatoire** obéit à une distribution statistique.

### 3.3 Approche probabiliste

Une étude de mécanique classique de la distribution des impacts n'est pas envisageable pour les phénomènes quantiques. Le comportement aléatoire des particules quantiques permet tout de même d'extraire des informations de nature *probabiliste* (23).

#### Remarque

Sur la figure ci-dessous, les zones les plus lumineuses correspondent aux zones où la probabilité d'impact d'un photon sur l'écran est la plus importante.



À l'opposé, la probabilité d'impact d'un photon est très faible pour les zones sombres.

### Définition

Les particules du monde microscopique sont soumises à des lois (24) probabiliste (25). Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir un comportement.

### Exemple

Un noyau de  $^{14}\text{C}$  radioactif a une chance sur deux d'être désintégré au bout de 5720 ans. L'étude d'un seul noyau radioactif ne donne aucune information, seule l'étude d'un grand nombre de noyaux permet d'extraire des informations de nature probabiliste.

 Exercices du chapitre 21 : numéros 8, 10, 24, 6 et 20 pages 409 à 413.