

## Partie Comprendre : Lois et modèles

### CHAP 15-COURS Transferts quantique d'énergie et dualité onde-particule

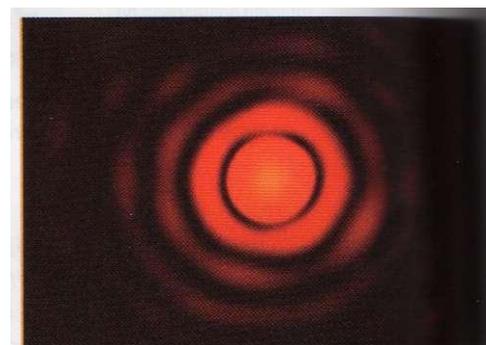
**Objectifs :** Comment la matière se comporte-t-elle à l'échelle microscopique ?

Notions et contenus	Compétences exigibles
<b>Dualité onde-particule</b> Photon et onde lumineuse.	Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.	Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule. Connaître et utiliser la relation $p = \frac{h}{\lambda}$ Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière.	Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.
<b>Transferts quantiques d'énergie</b> Émission et absorption quantiques. Émission stimulée et amplification d'une onde lumineuse. Oscillateur optique : principe du laser.	Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du laser (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie). <i>Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.</i>

#### 1. ASPECTS ONDULATOIRE ET PARTICULAIRE DE LA LUMIERE

##### 1.1 Comportement ondulatoire de la lumière

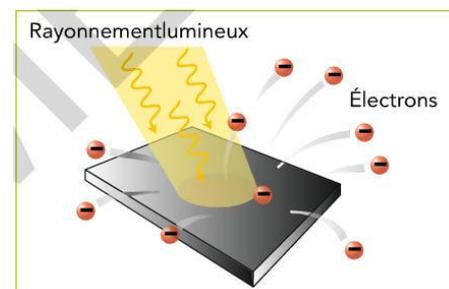
- Dans son Traité de la lumière, Christian Huygens (1629-1695) interprète la lumière comme la propagation **d'une onde**. Deux siècles plus tard, James Clerk Maxwell (1831-1879) introduit la théorie de la propagation des **ondes électromagnétiques**.
- **La lumière** devient alors un cas particulier d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.



*Les phénomènes de **diffraction** ou **d'interférences** sont des manifestations du comportement ondulatoire 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 xxe siècle, Einstein (1879-1955) propose le modèle du **photon**, qu'on peut considérer comme une particule transportant un quantum d'énergie.



*Certains phénomènes, comme **l'effet photoélectrique**, sont des manifestations du comportement particulaire de la lumière.*

##### 1.3. dualité onde-particule de la lumière

###### a) Définition

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

## b) Energie de la lumière

Un quantum d'énergie associé à une radiation lumineuse de fréquence  $\nu$  ( $\mu$ ) contient la quantité d'énergie  $\Delta E$  :

$$\Delta E = h \cdot \nu \text{ ou } \Delta E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

- $h$  : est une constante universelle appelée constante de **Planck**. ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ )
- $\nu$  ( $\mu$ ) : La fréquence du photon. En Hertz (Hz). C'est la fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon.
- $c$  : Célérité de la lumière ( $\text{m.s}^{-1}$ )
- $\lambda$  : longueur d'onde (m)

$\Delta E$  en Joules ; si  $\Delta E$  est  $< 0$ , l'atome se « désexcite » en cédant de l'énergie au milieu extérieur  
si  $\Delta E$  est  $> 0$ , l'atome « s'excite » en captant de l'énergie du milieu extérieur

**Application:** calculer l'énergie des rayonnements rouge et bleu, se déplaçant dans le vide, de longueur d'onde respectives  $\lambda(\text{rouge}) = 720 \text{ nm}$ ;  $\lambda(\text{bleu}) = 450 \text{ nm}$ . La célérité de la lumière dans le vide est  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

Réponse:

$$E(\text{rouge}) = h \cdot \nu(\text{rouge}) = \frac{h \cdot c}{\lambda(\text{rouge})} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{720 \times 10^{-9}}$$

$$E(\text{rouge}) = 2,76 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E(\text{bleu}) = h \cdot \nu(\text{bleu}) = \frac{h \cdot c}{\lambda(\text{bleu})} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{450 \times 10^{-9}}$$

$$E(\text{bleu}) = 4,42 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Rq : Plus la longueur d'onde est grande plus l'énergie est faible.

## 2. PARTICULES MATERIEL ET ONDE DE MATIERE

### 2.1 Hypothèse de Broglie

Dans sa thèse, publiée en 1924, Louis de Broglie 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,

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

### 2.2. La relation 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.

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

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

- $h$  : est une constante universelle appelée constante de Planck. ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ )
- $\lambda$  : longueur d'onde (m)
- $p$  : quantité de mouvement ( $\text{kg.m.s}^{-1}$ )

### 2.3. Condition d'observation du comportement ondulatoire

*Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la dimension  $a$  de l'obstacle ou de l'ouverture est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de matière  $\lambda$ .*

**Application:** Déterminer la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron de masse  $m = 9,11 \times 10^{-31}$  kg et de vitesse  $v = 400 \text{ m.s}^{-1}$ . Quelle est la taille de l'ouverture permettant d'observer la diffraction d'un faisceau d'électrons possédant ces caractéristiques?

Réponse:

$$p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$$

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

Pour observer la diffraction de ce faisceau d'électron il faut une ouverture  $a \approx \lambda \approx 10^{-6} \text{ m}$ .

## 3. ASPECT PROBABILISTE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

### 3.1. Phénomènes quantiques

Les phénomènes quantiques 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.

**Exemple :**

La dualité onde-particule est un phénomène quantique

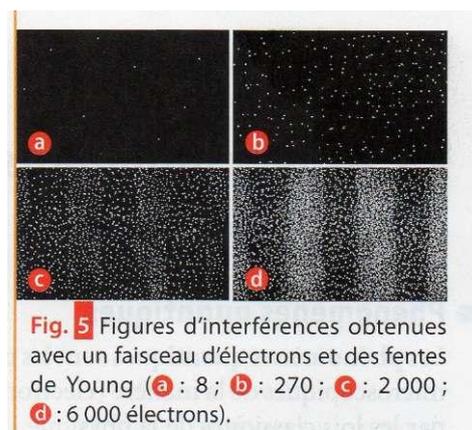
### 3.2. comportement aléatoire

La figure 5 illustre les interférences particule par particule obtenues avec un faisceau d'électrons traversant des fentes de Young.

La distribution spatiale des impacts des électrons sur l'écran semble chaotique pour un faible nombre d'électrons (8 à 2 000).

Pour un nombre important d'entre eux (6 000 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 de la particule de matière



### 3.3. Aspect 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.

*Les particules du monde microscopique sont soumises à des lois probabilistes. Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir un comportement.*

**Exemple :** ANIMATION : [interférence](#)

- Sur la figure ci-contre, 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.

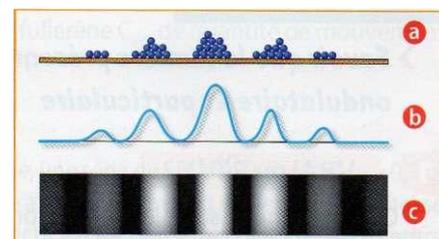


Fig. 7 Interférences obtenues avec de la lumière blanche.

a : nombre d'impacts sur l'écran ;  
b : probabilité de l'impact en fonction de la position ;  
c : figure d'interférences.

- Un noyau de  $^{14}\text{C}$  radioactif a une chance sur deux d'être désintégré au bout de 5 730 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

[RESUME : VIDEO](#)**4. LE LASER****1.1 Emission et absorption quantique**

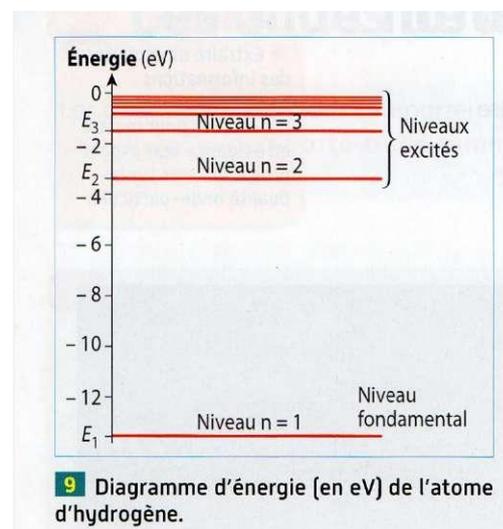
- L'énergie des entités microscopiques (atomes, ions et molécules) ne peut pas prendre n'importe quelle valeur.

- Les valeurs possibles de l'énergie sont en nombre restreint : on dit que l'énergie est **quantifiée**.

- Lors d'une transition radiative de l'entité entre deux niveaux d'énergie  $E_{\text{bas}}$  et  $E_{\text{haut}} > E_{\text{bas}}$

on a

$$\Delta E = E_{\text{haut}} - E_{\text{bas}} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad \text{cf 1.3.b)}$$



9 Diagramme d'énergie (en eV) de l'atome d'hydrogène.

**Il existe trois types de transitions :****a) Emission spontanée**

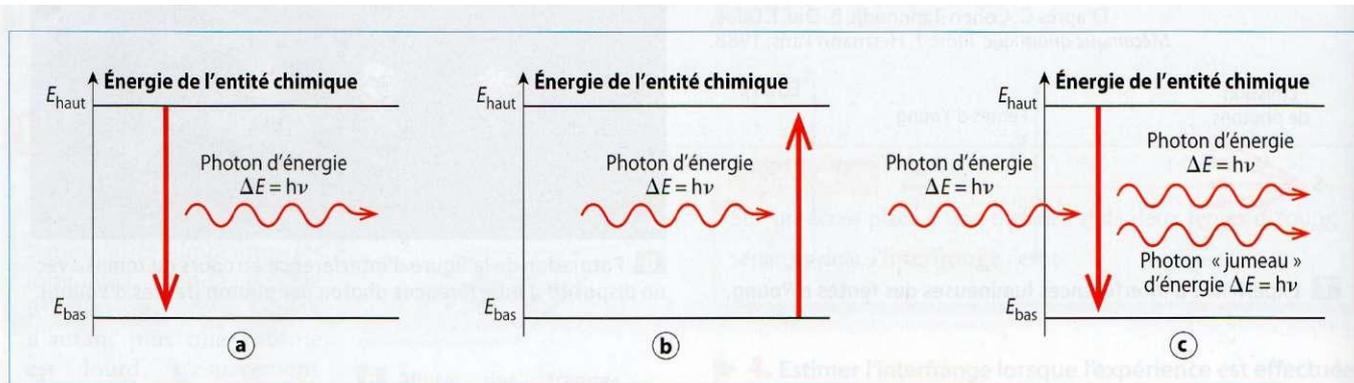
L'entité chimique excitée subit une transition vers un état de plus **basse** énergie en émettant un **photon** (doc. 10a) ;

**b) L'absorption**

un photon peut être absorbé par l'entité chimique, s'il apporte exactement **l'énergie** nécessaire à la transition vers un état d'énergie **plus** élevée (doc. 10b)

**c) L'émission stimulée**

L'entité chimique excitée peut aussi subir une transition radiative, toujours vers un état de plus basse énergie mais cette fois **provoquée** par un photon d'énergie  $\Delta E = E_{\text{haut}} - E_{\text{bas}}$ . Cette transition donne lieu à l'émission d'un nouveau photon, « **jumeau** » du premier qui n'est pas absorbé (doc. 10c).



## 1.2. Principe de fonctionnement du laser [ANIMATION exécutable](#)

### a) Milieu actif

La plupart des lasers sont composés d'un milieu actif ou amplificateur : il s'agit d'atomes, d'ions ou de molécules.

#### Exemple :

Le milieu est un gaz dans le laser hélium-néon, un solide dans les diodes laser (utilisées dans les lecteurs de CD) et le laser à rubis, ou encore un liquide dans un laser à colorant.

### b) Amplification de l'onde

- Les entités du milieu amplificateur sont excitées par un dispositif de pompage qui leur fournit de l'énergie. La transition d'un niveau excité vers un état d'énergie inférieure des entités du milieu actif est alors rendue possible.

- Un photon initialement émis de façon spontanée peut créer, par émission stimulée, un grand nombre de photons qui lui sont jumeaux, en une sorte de « réaction en chaîne » appelée amplification laser.

#### Remarques :

- Dans le cas d'un milieu à l'équilibre, il y a davantage d'entités dans les niveaux de plus basse énergie. Or l'amplification laser nécessite un état excité d'énergie  $E_{\text{haut}}$  plus peuplé que l'état d'énergie inférieure  $E_{\text{bas}}$ , afin que l'émission stimulée soit plus importante que l'absorption.

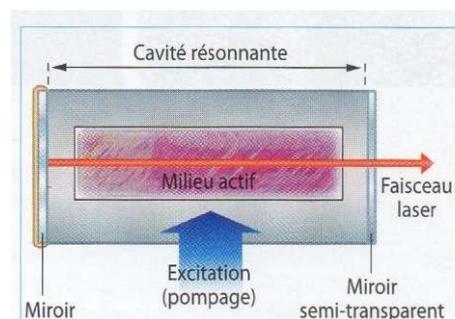
Cette « **inversion de population** » est assurée par le pompage mis au point initialement par le physicien français Alfred Kastler.

Le pompage s'effectue grâce à des flashes lumineux (« pompage optique »), ou à des décharges électriques (comme dans le cas du laser hélium-néon).

### c) Cavité de résonance

- Afin d'amplifier l'onde, il est souvent fait appel à une cavité résonnante constituée par exemple de deux miroirs, l'un parfait, l'autre assurant une transmission partielle vers l'extérieur de l'onde lumineuse qui se trouve dans la cavité (doc. 13).

- Le laser constitue un oscillateur optique, qui sélectionne une onde de fréquence déterminée, tout comme un oscillateur mécanique présente une fréquence propre



**13** Les éléments fondamentaux d'un laser sont le milieu actif, le dispositif de pompage et la cavité résonnante.

### 1.3. Propriétés des lasers

- Tous les photons émis par le laser ont la même fréquence. Un laser produit donc un **faisceau lumineux monochromatique**.
- Ces photons sont aussi en phase. Un laser produit donc un **faisceau lumineux cohérent**.
- Ces photons ont la même direction. Un laser produit donc un **faisceau lumineux directif**.
- La puissance du faisceau, donc l'énergie, est beaucoup plus concentrée dans l'espace

#### Rem :

Dans un laser à impulsions permet de **concentrer dans le temps** l'énergie grâce à des émissions de très courte durée.

### 5. DOMAINE SPECTRALE ET TRANSITION QUANTIQUE

- Une molécule est constituée d'atomes qui vibrent les uns par rapport aux autres (cf image ci-dessous).
- Elle possède donc de l'énergie vibratoire en plus de l'énergie électronique liée à la répartition des électrons.
- Ces deux énergies sont quantifiées, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent prendre que certaines valeurs particulières. On parle de valeurs discrètes.
- Comme pour l'atome, on définit des niveaux d'énergie électronique de la molécule. À chaque niveau d'énergie électronique correspondent des sous-niveaux d'énergie vibratoire

