

Chapitre 17 : Transferts quantiques d'énergie et dualité onde-particule

Connaissances et compétences :

- Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du laser (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie).
- Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.
- Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.
- 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-particule.
- Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$.
- 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.
- Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules.
- Évaluer des ordres de grandeurs relatifs aux domaines microscopique et macroscopique.

I. Aspect ondulatoire ou particulaire de la lumière

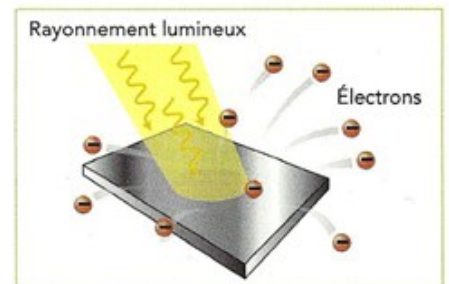
⇒ Activité documentaire 1 p 376 : « Ondes ou particules ? »

1. Comportement ondulatoire ou particulaire de la lumière

Les phénomènes d'*interférences* et de *diffraction* étudiés au chapitre 3 sont des manifestations du comportement *ondulatoire* de la lumière.

Certains phénomènes comme l'*effet photoélectrique* ou l'effet Compton sont des manifestations de l'aspect *particulaire* de la lumière. La lumière est alors décrite comme un *flux de photons*.

Un photon est une particule non chargée de *masse nulle* transportant un *quantum d'énergie* et se déplaçant à la *vitesse de la lumière*.



Schématisme de l'effet photoélectrique.

2. Dualité onde-particule de la lumière

Les concepts classiques d'onde et de particule pris isolément sont insuffisants pour décrire le comportement de la lumière : la lumière se comporte plutôt comme une onde ou plutôt comme une particule selon les *conditions de l'expérience*. Ce double comportement est désigné par l'expression : *dualité onde-corpuscule*.

L'énergie E du photon est reliée à la fréquence ν (longueur d'onde λ) de l'onde électromagnétique associée par :

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

E en joule (J), h constante de Planck en J.s ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s), ν en hertz (Hz) et λ en mètre.

II. Particules et onde de matière

⇒ Activités documentaires 2 p377 + 4 p380-381

1. Relation de De Broglie

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

A chaque particule en mouvement est associée une *onde de matière* de longueur d'onde λ , liée à la quantité de mouvement p de la particule par la *relation de de Broglie* :

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

p en kg.m.s^{-1} , h constante de Planck en J.s, λ en mètre.

2. Condition d'observation du comportement ondulatoire

Pour que l'aspect ondulatoire se manifeste, il faut que la dimension a de l'obstacle ou de l'ouverture soit du **même ordre de grandeur** que la longueur d'onde de matière λ .

C'est le cas pour des particules comme l'électron, le proton et le neutron.

La constante de Planck étant très petite, les objets macroscopiques sont associés à des longueurs d'onde trop faibles pour que l'aspect ondulatoire puisse se manifester.

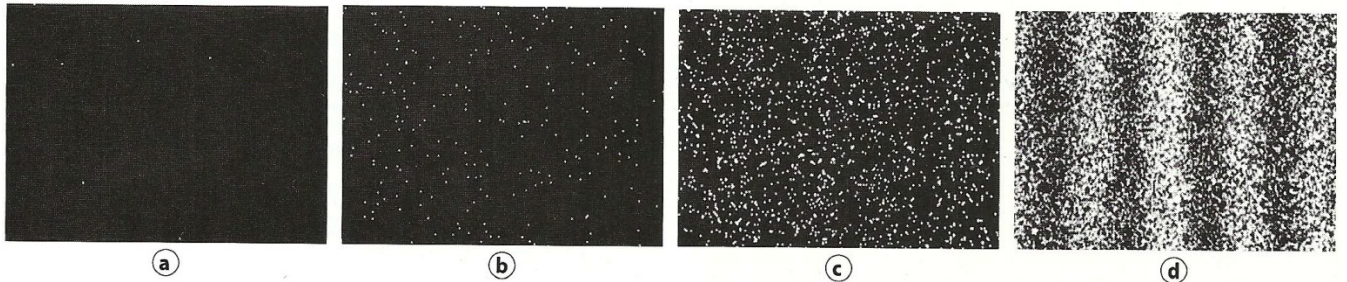
Une onde est peu affectée par la rencontre d'objets de dimension très inférieure à sa longueur d'onde. On utilise le comportement ondulatoire des électrons dans les **microscopes électroniques** pour observer des détails de l'ordre des distances interatomiques.

III. Aspect probabiliste des phénomènes quantiques

⇒ Activité documentaire 2 p377

Les **phénomènes quantiques** interviennent dans le domaine microscopique de la matière lorsque la **mécanique classique ne s'applique pas**.

Les phénomènes quantiques présentent un **aspect probabiliste** : seule l'étude d'un **grand nombre de particules** permet d'en prévoir le comportement.



Formation de la figure d'interférence au cours du temps électron par électron, dans le dispositif des fentes d'Young.
a. Temps de pose le plus court ; d. temps de pose le plus long.

IV. Comment fonctionne un laser

⇒ Activité : « Fonctionnement et applications du LASER »

Le terme laser est l'acronyme de **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (amplification lumineuse par émission stimulée de rayonnement).

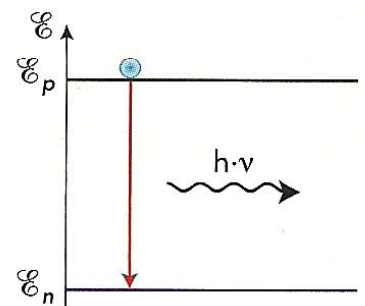
1. Quantification de l'énergie des atomes (rappel)

Les niveaux d'énergie d'un atome sont **quantifiés** : ils ne peuvent prendre que des valeurs bien déterminées. Lorsque l'atome est à son état d'énergie le plus bas, il est dans l'**état fondamental**, état stable de l'atome. Les autres états sont des **états excités**, instables. On appelle **transition** le passage d'un état à un autre.

2. Emission spontanée (rappel)

Un atome dans un état excité d'énergie E_p peut émettre spontanément un photon de fréquence ν en passant à un état d'énergie E_n inférieure. L'énergie du photon est $E = E_p - E_n = h \cdot \nu$.

Dans ce processus d'émission spontanée le **photon** est émis dans une **direction aléatoire**.

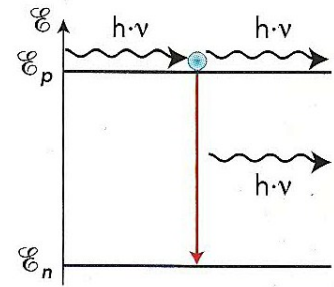


3. Emission stimulée

Lorsqu'un photon d'énergie $E_p - E_n$ rencontre une particule dans un état excité E_p , cette particule peut retrouver un état d'énergie plus stable E_n en émettant un photon de même énergie $E_p - E_n$.

Ce mode d'émission est appelé l'**émission stimulée**.

L'émission spontanée produit des **photons** qui ont la **même direction** que les photons incidents.



4. Inversion de population

Le laser est constitué d'une cavité dans laquelle se trouvent des atomes. La majorité de ces atomes étant dans un état stable, pour **augmenter le nombre d'émissions stimulées**, il faut créer une **inversion de population**, c'est-à-dire maintenir la majorité des atomes dans un **état excité** : cette opération est appelée **pompage optique**.

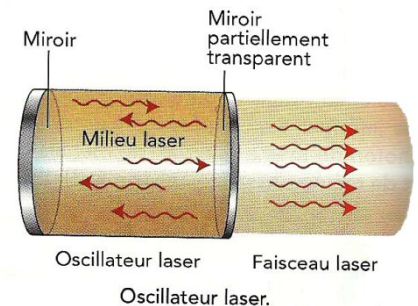
On utilise couramment des flashes de lumière pour l'inversion de population.

5. Amplification

Le laser produit une lumière très directive. Pour obtenir ce faisceau, la cavité est placée entre deux **miroirs**, l'un parfaitement réfléchissant, l'autre semi-réfléchissant.

La **multiplication des passages** permet d'**augmenter** le nombre de photons identiques produits par émission stimulée. Les pertes (photons disparus ou absorbés par les parois) sont compensées par des flashes qui maintiennent l'inversion de population.

Seuls les photons qui se déplacent dans la direction perpendiculaire aux miroirs peuvent sortir de la cavité laser : les miroirs ont ainsi pour effet de **sélectionner la direction** des photons.



6. Propriétés du laser

- **Directivité du faisceau** : le faisceau émis par un laser est très directif : l'angle de divergence est faible (de l'ordre du milliradian).
- **Monochromaticité** : tous les photons émis ont même fréquence.
- **Cohérence** : les photons émis sont en phase : le faisceau lumineux d'un laser est cohérent.
- **Concentration spatiale d'énergie** : les lasers sont des sources lumineuses très intenses concentrant leur énergie dans un pinceau très étroit.
- **Concentration temporelle d'énergie** : l'énergie rayonnée peut être concentrée dans le temps dans les lasers à impulsion grâce à des émissions d'impulsions de courte durée (lasers pulsés ou à impulsion)

V. Domaine spectral et transitions quantiques

Comme les atomes, toutes les entités (molécules, ions, noyaux) possèdent des énergies quantifiées. L'ordre de grandeur de l'énergie mise en jeu lors des transitions entre deux niveaux dépend du système :

- l'énergie de transition des noyaux lors des réactions nucléaires est de l'ordre du MeV (rayons γ) ;
- l'énergie de transition entre niveaux électroniques est de l'ordre de 1 à 10 eV (UV, visible) ;
- les molécules possèdent en plus des niveaux d'énergie de vibration de l'ordre de 10^{-1} eV (domaine de l'IR) et de rotation de l'ordre de 10^{-3} eV (domaine de micro-ondes).

Domaines spectraux et transitions

