



## Chapitre E2. Transferts quantiques et dualité onde-particule

### **Activité d'introduction** La lumière comme une onde ou comme une particule : un débat pas encore tranché au début du XXe siècle...

À l'aide du document ci-dessous et de vos connaissances, répondre aux questions suivantes.

1. Quel phénomène vu en début d'année et non cité dans le texte plaide en faveur du modèle ondulatoire ?
2. a. Citer une observation qui s'explique par le modèle particulaire.  
b. Citer une observation qui s'explique par le modèle ondulatoire.
3. Rappeler l'expression de l'énergie transportée par un photon pour un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$  se propageant à la vitesse  $c$ , puis justifier l'expression écrite en italique dans le texte : *un rayonnement de plus grande longueur d'onde, donc de moins grande énergie.*

#### **Du particulaire à l'ondulatoire**

Après de nombreuses théories au sujet de la lumière, le Britannique Isaac NEWTON (1642-1727) impose son modèle de la lumière au XVII<sup>e</sup> siècle. Pour lui, il s'agit d'un jet de particules qui diffèrent suivant la couleur de la lumière. On parle de « modèle particulaire ». Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer les phénomènes d'interférences (voir **chapitre 3**). Pour les interpréter, le modèle ondulatoire est élaboré au XIX<sup>e</sup> siècle à la suite des travaux du Britannique Thomas YOUNG (1773-1829) et du Français Augustin FRESNEL (1788-1827). Très vite, ce modèle prédomine pour atteindre son apogée en 1864 avec les travaux de l'Écossais James MAXWELL (1831-1879).

Pourtant, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la découverte de l'effet photoélectrique, par l'Allemand Heinrich HERTZ (1857-1894), ne peut s'expliquer par le caractère ondulatoire de la lumière.

#### **L'effet photoélectrique**

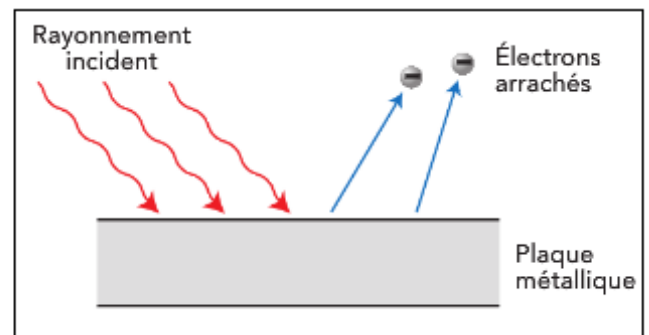
Lorsqu'un métal est éclairé par un rayonnement ultraviolet (**doc. 1**), des électrons sont arrachés de sa surface.

En revanche, si on utilise *un rayonnement de plus grande longueur d'onde, donc de moins grande énergie*, les électrons ne sont pas arrachés, même avec une durée d'exposition plus longue.

#### **De l'ondulatoire au particulaire**

Cette dernière observation va avoir de grandes conséquences sur la modélisation de la lumière. D'après le modèle ondulatoire, l'énergie transférée par rayonnement au système dépend de la durée d'exposition. Ainsi, une exposition prolongée du métal à un rayonnement devrait permettre d'accumuler suffisamment d'énergie pour arracher un électron quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement. Le modèle ondulatoire ne permet donc pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

En 1905, pour expliquer cet effet, Albert EINSTEIN (1879-1955) postule qu'un rayonnement est constitué de particules transportant des quanta d'énergie. En 1926, l'Américain Gilbert LEWIS (1875-1946) les nomme « photons ». Lors de l'effet photoélectrique, pour qu'un électron soit arraché, il faut que l'énergie du photon incident soit suffisante. Si ce n'est pas le cas, l'électron n'est pas arraché, quel que soit le nombre de photons incidents.



**Doc. 1** Schématisation de l'effet photoélectrique.

#### **La dualité onde-particule**

Actuellement, suite aux travaux du Français Louis DE BROGLIE (1892-1987) en 1923, la lumière, et plus généralement les ondes électromagnétiques, sont décrites comme des flux de photons. Un photon se comporte soit comme une onde, soit comme une particule, suivant le contexte expérimental considéré. On parle de dualité onde-particule. Un photon n'est ni une onde ni une particule. C'est un objet quantique.

En 1921, A. EINSTEIN reçoit le prix Nobel de Physique pour ses travaux sur l'effet photoélectrique. En 1929, L. DE BROGLIE le reçoit pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons.



## Activité 1 : Les différentes facettes de la lumière

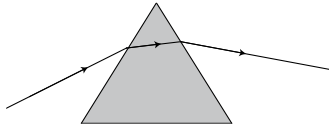
### 1<sup>ère</sup> partie : À propos du bi-prisme de Fresnel

- Lire attentivement les documents ① et ②.

#### Document ① : rappel sur le prisme

Les physiciens appellent « prisme » un prisme droit à base triangulaire taillé dans un matériau transparent.

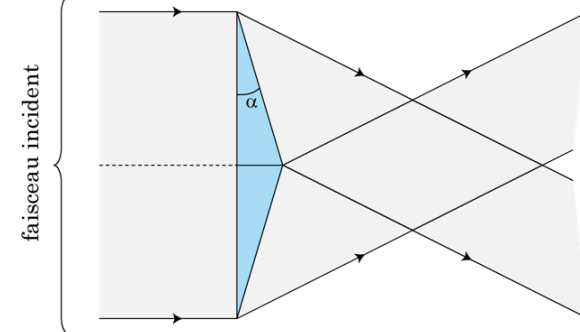
Un rayon de lumière qui traverse un prisme subit deux déviations successives dues au phénomène de réfraction :



#### Document ② : le bi-prisme de Fresnel

Le bi-prisme de Fresnel est constitué de deux prismes identiques, possédant un angle droit et accolés l'un à l'autre.

Si le bi-prisme est éclairé avec un faisceau de lumière monochromatique, on peut observer des franges d'interférence en plaçant un écran dans la zone d'interférence.



L'angle  $\alpha$  est très exagéré sur la figure ci-dessus. En réalité il est très faible, si bien qu'on peut négliger l'épaisseur du bi-prisme. Dans cette approximation, si un écran est placé à une distance  $D$  du bi-prisme et perpendiculairement à la direction du faisceau incident, on observe des interférences avec un interfrange de valeur :

$$i = \frac{\lambda}{2(n-1)\alpha}$$

- Justifier que ce dispositif permette d'observer des interférences. Hachurer sur la figure du document ② la zone où l'on peut observer des interférences.

### 2<sup>e</sup> partie : Analyse d'une expérience

La physique quantique est une branche de la physique, construite, entre autres, à partir du concept de dualité onde-particule. Cette idée consiste à admettre que certains systèmes ne sont ni des particules ni des ondes mais des « entités quantiques » dont le comportement présente à la fois des aspects ondulatoires et des aspects particuliers.

- Exploiter les documents ①, ② et ③. pour expliquer en quoi l'expérience décrite est une preuve expérimentale de la dualité onde-particule de la lumière. On attend un paragraphe argumenté et une analyse quantitative (on doit vérifier que l'interfrange mesuré est en accord avec l'interfrange théorique).

#### Document ③ : l'expérience des interférences photon par photon

En 2007, Vincent Jacques, chercheur français à l'ENS de Cachan a réalisé une expérience dont on propose ci –après une description simplifiée.

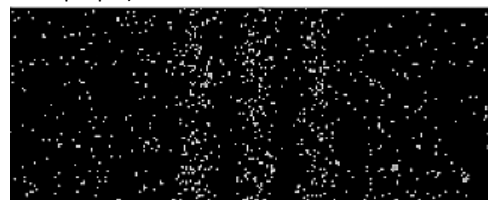
- La source utilisée, par un moyen que nous ne détaillons pas ici, émet la lumière photon par photon. La longueur d'onde des photons vaut en moyenne :  $\lambda = 670 \text{ nm}$
- Un bi-prisme de Fresnel (indice  $n = 1,5142$  et angle au sommet  $\alpha = 0,43^\circ$ ) est placé derrière la source.
- Une caméra CCD refroidie à  $25^\circ\text{C}$  est placée derrière une lentille convergente et enregistre en temps réel la figure obtenue à la sortie du bi-prisme.

- Clichés obtenus

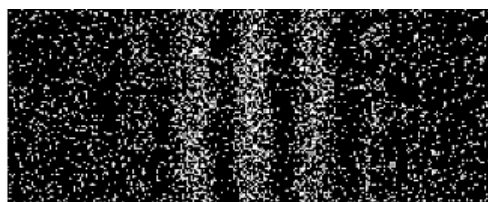
(l'échelle indiquée tient compte du grandissement du système optique) :



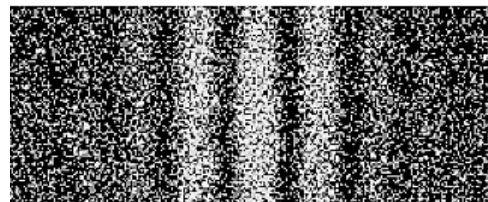
cliché obtenu après 10 s



cliché obtenu après 100 s



cliché obtenu après 500 s



cliché obtenu après 2000 s

Sources :

- Vincent Jacques, thèse de doctorat, « Source de photons uniques et interférences à un seul photon. De l'expérience des fentes d'Young au choix retardé. » (2007)
- La vidéo réalisée par la caméra CCD est téléchargeable sur le site : [http://www.physique.ens-cachan.fr/old/franges\\_photon/interference.htm](http://www.physique.ens-cachan.fr/old/franges_photon/interference.htm) ou sur [www.prof-vince.fr](http://www.prof-vince.fr)



## Activité 2 : L'atome : onde ou particule ?

En 1927, le jeune Louis de Broglie, en soutenant sa thèse, énonce un postulat qui va révolutionner la physique, en particulier notre conception de la matière. Cette activité propose d'analyser une expérience qui valide le postulat de Louis de Broglie. Une discussion est ensuite proposée afin de déterminer dans quel(s) domaine(s) les apports des travaux de de Broglie sont décisifs.

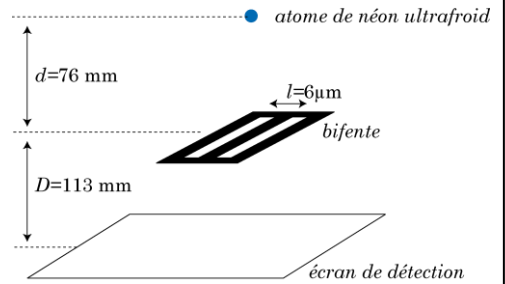
### 1<sup>ère</sup> partie :

#### étude newtonienne de la chute d'un atome

On considère que l'atome est en chute libre. Tous les atomes de néon ne partent pas exactement de la même position (la source n'est pas ponctuelle) mais on peut supposer que leurs mouvements ont tous la même direction verticale. Si on applique la mécanique newtonienne, que prévoit-on d'observer sur l'écran de détection suite à la chute d'un grand nombre d'atomes ? On pourra illustrer cette prévision d'un schéma !

#### Document ① : effet d'une fente double sur un faisceau d'atomes de néon

L'expérience décrite ci-contre a été réalisée en 1992. Des atomes de néon sont piégés puis libérés sans vitesse initiale au-dessus d'une fente double. Un écran est placé sous la fente et détecte les impacts des atomes.



### Act.2 - 2<sup>ème</sup> partie : validation expérimentale des travaux de de Broglie

► Exploiter les documents ① à ③ pour répondre aux questions qui suivent.

1. Noter toutes les différences entre votre prévision de la question 3 de la 1<sup>ère</sup> partie et les résultats effectivement obtenus.
2. Sans faire de calcul, expliquer en quoi cette expérience valide l'hypothèse de Broglie sur les « ondes de matière ».

#### Document ③ : la thèse de Louis De Broglie

En 1905, Albert Einstein et Max Planck postulent que la lumière se propage par quanta d'énergie, les photons. Cette hypothèse à laquelle Planck lui-même ne croit pas vraiment permet d'interpréter nombre de phénomènes observés mais incompris à l'époque : le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique, etc. En 1913, Niels Bohr énonce que l'énergie des atomes aussi est quantifiée : cette hypothèse lui permet d'interpréter les spectres de raies d'émission. Cependant toutes ces hypothèses et les lois qui en découlent sont *phénoménologiques* et non liées entre elles. En particulier la quantification de l'énergie des atomes semble sans lien avec celle de l'énergie transportée par la lumière, ce qui laisse Albert Einstein lui-même très sceptique. Cependant un jeune étudiant en doctorat de physique nommé Louis de Broglie soutient en 1924 une thèse qui est aujourd'hui considérée comme la première pierre de la théorie quantique. Il énonce que : « À toute particule matérielle de masse  $m$  et de vitesse  $v$  doit

être associée une onde de matière de longueur d'onde :  $\lambda = \frac{h}{p}$ ,  $h$  étant la constante de Planck

et  $p$  la quantité de mouvement de la particule. »

Albert Einstein, lorsqu'il lit la thèse de Louis de Broglie, déclare que ce jeune physicien a « levé un coin du grand voile »...

#### Document ② : résultat de l'expérience décrite dans le document ①

État de l'écran de détection après la réception de 6000 atomes environ :



Source : Fujio Shimizu et al. : double-slit interference with ultracold metastable neon atoms, PHYSICAL REVIEW A (1992)

### Act.2 - 3<sup>ème</sup> partie : « quantique ou non quantique » ?

Louis de Broglie a énoncé que toute particule peut avoir un comportement ondulatoire : elle peut être considérée comme une « entité quantique » dont le comportement rappelle à la fois celui des ondes et celui des objets matériels. Cela remet-il totalement en cause la physique de Newton ? Nous cherchons ici un *critère permettant d'évaluer l'importance du caractère ondulatoire d'un objet*.

1. Calculer la longueur d'onde qu'on peut associer à chacun des systèmes suivants :

| Objet   | Masse                     | Vitesse                              | longueur d'onde |
|---|---------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| La Lune   | $7 \times 10^{22}$ kg     | $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$   |                 |
| Une balle de tennis après un service              | 55 g                      | $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ |                 |
| Un grain de poussière dans l'air                  | $10^{-15}$ kg             | $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$   |                 |
| L'atome de néon lorsqu'il atteint la fente double | $3,35 \times 10^{-26}$ kg | $1,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ |                 |

2. Pour évaluer l'importance du caractère ondulatoire d'un objet, on peut comparer sa longueur d'onde de de Broglie à une dimension caractéristique de l'objet ou de son environnement. Seul l'atome de néon a un comportement quantique : en déduire un critère qui permet d'indiquer la condition de prise en compte de la théorie quantique.
3. En comparant la longueur d'onde de de Broglie associée aux atomes de néon à plusieurs valeurs pertinentes de la situation étudiée ici, justifier que :
  - la mécanique de Newton permet bien de déterminer la vitesse à laquelle l'atome atteint la double fente ;
  - la prise en compte du caractère ondulatoire de l'atome est nécessaire si l'on veut rendre compte de son comportement après la double fente.

Lire ensuite le § B2 et vérifier que le critère indiqué correspond bien à ce qui est mis en évidence sur cet exemple.

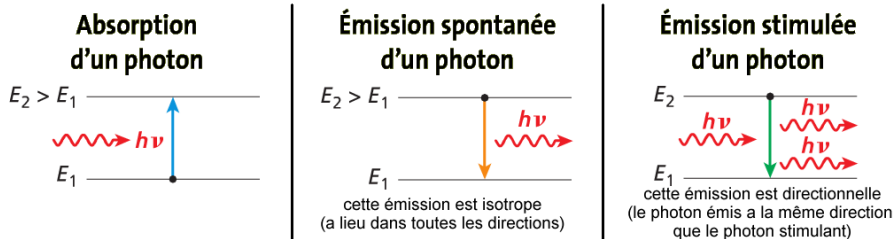


### Activité 3 : Principe de fonctionnement des LASER

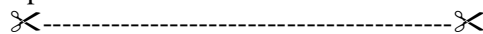
LASER signifie *light amplification by stimulated emission of radiation*.

1. Donner trois propriétés remarquables de la lumière LASER.
2. Proposer une grandeur qui permet de caractériser la directivité d'une source lumineuse.
3. Comme l'intensité acoustique, l'intensité lumineuse correspond à la puissance par unité de surface. Donner l'unité du système international de l'intensité lumineuse.

**Document ① : Trois modes de transferts quantique d'énergie pouvant avoir lieu entre un photon correspondant à un rayonnement de fréquence notée  $\nu$  et un atome (ou une molécule) pouvant occuper des niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$**



4. À l'aide du document ①, proposer une hypothèse au sujet du principe physique de fonctionnement du laser qui expliquerait les trois propriétés du laser : on rédigera un paragraphe argumenté qui indiquera en quoi le principe permet d'expliquer chacune des propriétés du laser ; on donnera également une condition importante sur les populations des niveaux d'énergie qui permet l'émission laser.

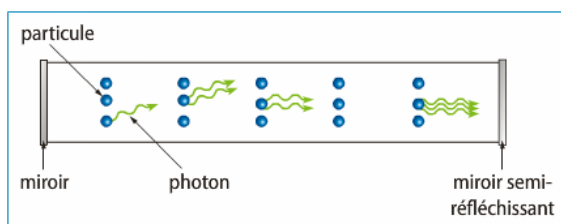


**Activité 3-suite** À l'aide des documents ② et ③ supplémentaires, répondre aux questions suivantes :

**Document ② : Principe de fonctionnement d'un laser**

Pour faire fonctionner un laser, il faut réaliser une inversion de population, qui consiste à placer une majorité de particules dans un état excité. L'émission stimulée prédomine alors sur l'absorption.

Pour amplifier l'émission stimulée et sélectionner la direction des photons, on utilise un dispositif, appelé cavité laser, constitué par deux miroirs en regard, dont l'un est parfaitement réfléchissant et l'autre, semi-réfléchissant, permettant ainsi au faisceau laser de sortir. À chaque aller-retour entre les deux miroirs, l'amplification est renforcée.



5. Que deviennent les photons dont la direction n'est pas perpendiculaire au miroir ?
6. Indiquer les deux fonctions de la cavité.
7. Expliquer pourquoi, lorsqu'on utilise des transferts d'énergie au sein de molécules, la lumière émise n'est plus visible. Dans quel domaine se trouve-t-elle ?

**Pour aller plus loin...**

Si les niveaux d'énergie concernent une molécule, on parle de MASER (*microwaves amplification by stimulated emission of radiation*), qu'on a su réaliser quelques années avant les premiers LASER en 1960. Le premier MASER a été mis au point en 1954 à l'université de Columbia (New York, USA) et utilisait de l'ammoniac  $\text{NH}_3$ .

Quand on a réalisé une surpopulation suffisante de l'état haut, l'amplification *maser* ou *laser* peut se déclencher à condition que l'émission stimulée l'emporte sur l'émission spontanée. Les probabilités d'émission spontanée et stimulée sont respectivement proportionnelles aux coefficients d'Einstein  $A_{21}$  et  $B_{21}$  liés par la relation suivante :  $B_{21} / A_{21} = \lambda^3 / (8 \pi h)$ .

**Expliquer pourquoi on peut en déduire qu'il a été plus facile de mettre au point un MASER qu'un LASER.**

**Document ③ : Domaines spectraux et transitions quantiques associées**

