

# Dualité onde-particule

---

## I. Photon et onde lumineuse

### I.1. Introduction

### I.2. Enjeux pédagogiques

### I.3. Le photon

La lumière, c'est combien de photons ?  
Utilisation d'une lame semi-réfléchissante  
Conclusion

## II. Onde de matière – Relation de de Broglie

### II.1. Introduction historique

Relation de de Broglie  
Première vérification expérimentale  
Commentaires

### II.2. Interférences à deux fentes avec des atomes de néon ultrafroids

Introduction  
Le dispositif expérimental  
Commentaires

### II.3. Exemples

Expériences des fentes d'Young avec des atomes  
Expériences d'interférence avec des molécules de fullerène C<sub>60</sub>  
Interférences avec des électrons  
Des électrons en boîte  
Explorer la matière

### II.4. Conclusions

## Annexe 1 : le programme et les commentaires

# Dualité onde-particule

La dualité onde-particule est introduite dans le nouveau programme de terminale S. L'extrait de programme correspondant ainsi que les commentaires qui lui sont associés, parus dans le bulletin officiel spécial n°8 du 13 octobre 2011, figurent en annexe 1.

Ce document, destiné au professeur, analyse cette partie du programme de terminale S. En particulier, il montre que le professeur peut s'appuyer sur des expériences très récentes pour construire son argumentation ou illustrer son propos. Il ne s'agit en aucun cas d'un cours pour les élèves, même s'il suggère quelques pistes au professeur pour élaborer des activités, sans aucun objectif prescriptif.

## Prologue historique

Le jeune Max Planck s'inscrit à l'université de Munich pour y étudier les sciences exactes en octobre 1874, il a alors 16 ans et ne suit pas les conseils du physicien von Jolly qui le dissuade de se lancer dans la physique où « *tout a été découvert, et où il ne reste que quelques lacunes sans importance à combler* »<sup>1</sup>.

Quelques années plus tard Max reçoit le prix Nobel de physique en 1918 « *pour avoir fondé la mécanique quantique* ».

La physique du début du XX<sup>ème</sup> siècle est marquée par la naissance de la théorie de la relativité restreinte en 1905 par Einstein, par celle de la relativité générale en 1915 par le même savant et enfin par celle de la mécanique quantique dans les années 20. Il est remarquable de noter que plus de 120 prix Nobel ont été attribués pour des découvertes relatives au monde de la physique quantique<sup>2</sup> ; ceci souligne la vitalité et l'importance de ce domaine de la physique.

Le programme de TS aborde la physique quantique en limitant et en adaptant ses objectifs à une première présentation nécessitant un formalisme modeste mais permettant d'appréhender certains des enjeux de la physique et de la chimie du XXI<sup>ème</sup> siècle.

## I. Photon et onde lumineuse

### I.1. Introduction : concepts de la physique classique

Un élève de terminale a déjà acquis un certain niveau de représentation concernant les particules classiques et les champs classiques.

Le concept de « particule classique » est associé à un objet réel, discret, ayant un caractère individualisé et une certaine extension spatiale que l'on réduit parfois avec la notion de particule ponctuelle. Après avoir fixé un référentiel, on peut définir sa position, puis sa trajectoire qui est le lieu des points occupés par celle-ci au cours du temps.

On lui associe des propriétés physiques comme la masse, la charge et on la soumet à des interactions que l'on modélise par des forces. On s'intéresse alors à l'étude prédictive du mouvement des particules à l'aide notamment de la seconde loi de Newton :  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ . On est conduit à introduire d'autres grandeurs comme la quantité de mouvement, l'énergie cinétique et l'énergie mécanique, en s'intéressant spécifiquement à celles qui sont conservées.

<sup>1</sup> J-C. Boudenot et G. Cohen-Tannoudji, « *Max Planck et les Quanta* », Ellipses, 2001

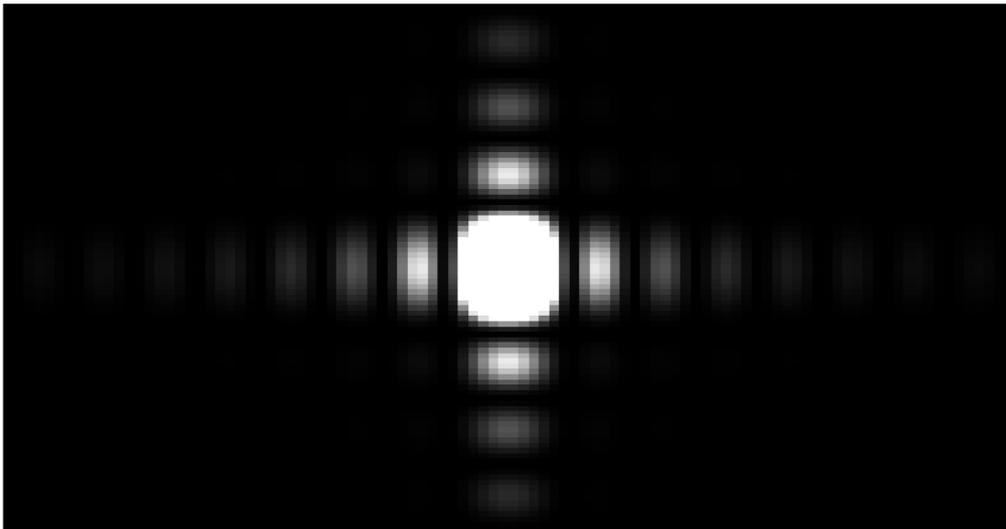
<sup>2</sup> J.L. Basdevant : « *12 leçons de mécanique quantique* » Vuibert. 2006

A l'issue de l'étude de la partie « Temps, mouvement et évolution » les élèves de TS ont acquis des bases solides sur les notions qui permettent d'étudier les particules au sens classique du terme.

La partie « Caractéristiques et propriétés des ondes » introduit la notion d'onde. Celle-ci est très différente de la notion de particule : l'onde fait appel à des grandeurs continues (les champs), occupe un domaine étendu de l'espace et est souvent caractérisée par la donnée d'une ou plusieurs grandeurs vibratoires. On introduit le concept d'onde à l'aide d'exemples qui permettent d'en visualiser le déplacement : c'est le cas d'une déformation qui se propage à la surface de l'eau, ou d'une elongation transversale sur une corde ; ces situations sous-tendent l'existence d'un milieu support. On aborde ensuite le cas de l'onde lumineuse, elle est un « vrai » champ de la physique classique que l'on ne peut pas décrire en terme de déplacement d'un milieu hypothétique ; ces champs « doivent être pensés comme existant par eux mêmes<sup>3</sup> ». On peut souligner que dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, les physiciens pensent que les ondes lumineuses ne sont pas des ondes « comme les autres » car elles se propagent dans le vide.

En dehors de la notion de propagation, les phénomènes de diffraction et d'interférences sont les deux notions importantes du programme de TS relatives aux ondes. De manière immédiate, les élèves associeront diffraction et interférences au concept d'onde.

Les compétences exigibles sur le thème de la diffraction sont en particulier « d'identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction » et de « connaître et exploiter la relation  $\theta = \frac{\lambda}{a}$  ».



**Figure de diffraction par une fente carrée de côté  $a$  :**  
**l'extension angulaire de la figure est fixée par la relation  $\theta = \frac{\lambda}{a}$**

Concernant le phénomène d'interférences, la compétence exigible sur ce thème est « Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques. » Pour les ondes lumineuses, le dispositif des trous d'Young ou des fentes d'Young peut constituer une référence pertinente, la manifestation du caractère ondulatoire de la lumière est identifiée par l'existence de maxima et de minima de l'éclairement comme on peut l'observer sur une cuve à onde. Notons que l'analogie entre les deux situations n'est pas si simple à construire pour un élève qui ne dispose pas du formalisme adapté. L'aspect ondulatoire implique l'existence d'un principe de superposition de l'amplitude des différentes ondes présentes en un même point, et l'élève doit parvenir à s'étonner puis à comprendre que la superposition de deux ondes lumineuses puisse donner des franges sombres.

<sup>3</sup> J.M.Lévy-Leblond ; F. Balibar ; « *Quantique, Rudiments* » InterEditions 1984

L'interfrange  $\frac{\lambda D}{a}$  permet de relier une grandeur géométrique mesurable de la figure d'interférence, à une propriété intrinsèque de l'onde : sa longueur d'onde  $\lambda$ . Cette relation peut faire l'objet d'une étude lors d'une activité expérimentale.

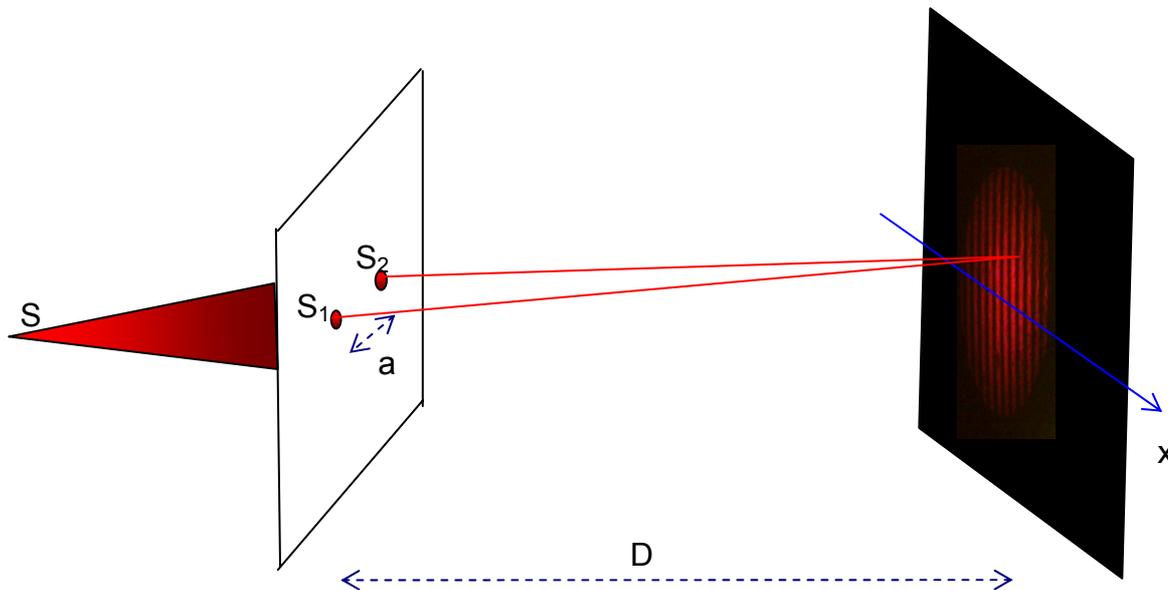


Figure d'interférences avec deux trous d'Young<sup>4</sup> : l'interfrange est donnée par  $\frac{\lambda D}{a}$

## I.2. Enjeux pédagogiques

Sans préjuger d'une progression différente toujours possible, lorsque les élèves abordent la partie « Dualité onde-particule », ils ont, dans ce domaine, une vision assez tranchée des objets de la physique classique : il y a les particules et les ondes. Comme nous l'avons vu, ils associent à chaque objet un mode de description, des techniques d'étude et des propriétés spécifiques.

Ils aborderont ces nouveaux concepts de la physique quantique avec leur culture de physique classique et utiliseront, comme les physiciens l'ont fait avant eux, un vocabulaire de cette physique classique qui, comme nous le verrons, n'est pas sans soulever certaines difficultés.

Ainsi, tout en s'appuyant sur leur connaissance de physique classique, il faudra les convaincre que les concepts de la mécanique quantique nécessitent de nouveaux objets qui ne sont ni des ondes ni des particules et qui obéissent à d'autres lois que celles de la physique classique.

## I.3. Le photon

Les élèves de TS connaissent la nature ondulatoire de la lumière : les phénomènes de diffraction et d'interférences constituent des preuves de ce caractère ondulatoire.

En classe de première, l'aspect corpusculaire de la lumière est introduit avec la notion de photon et d'énergie d'un photon, il est directement associé à la notion de quantification des niveaux d'énergie dans la matière.

Le concept de photons résulte d'une succession de travaux expérimentaux et de modélisations théoriques. Les études théoriques du rayonnement du corps noir par Planck, puis de l'effet photoélectrique par Einstein et de l'effet Compton par Compton ont permis aux physiciens de faire émerger le concept de photon en lui attribuant une énergie et une quantité de mouvement.

S'il semble difficile de présenter ce type d'expériences où se manifeste l'aspect corpusculaire de la lumière, plusieurs possibilités permettent d'illustrer cette notion au niveau de la terminale S.

<sup>4</sup> Il existe naturellement d'autres dispositifs d'interférences.

La première application « La lumière, c'est combien de photons » a pour objectif d'habituer les élèves à manipuler des ordres de grandeurs autour des flux de photons. La seconde, « Utilisation d'une lame semi-réfléchissante » est plus fondamentale ; elle constitue une illustration de la manifestation corpusculaire de la lumière.

## La lumière, c'est combien de photons<sup>5</sup> ?

En s'inspirant de l'article de Jean-Michel Courty et Nicolas Treps « La lumière, c'est combien de photons<sup>6</sup> ? », on peut évaluer différents ordres de grandeurs relatifs aux nombres de photons reçus par un détecteur ou émis par une source lumineuse.

Dans le cas de l'œil par exemple, les astronomes affirment qu'il est possible de voir à l'œil nu une étoile de magnitude de 6,5. L'échelle de magnitude étant logarithmique, cela correspond à un flux lumineux environ  $10^{13}$  fois plus faible que le flux solaire.

La magnitude apparente est définie par la relation :  $m = m_o - 2,5 \log(\Phi)$  où  $m_o$  est une magnitude de référence et  $\Phi$  le flux lumineux (en  $W.m^{-2}$ ) mesuré par un détecteur terrestre.

### Échelle des magnitudes apparentes

m (mag)	<u>Objet céleste</u>
-26,7	<u>Soleil</u>
-12,6	Pleine <u>Lune</u>
-1,5	Étoile la plus brillante ( <u>Sirius</u> )
≈ +6,5	Étoile la plus faible visible à l'œil nu

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Magnitude\\_apparente](http://fr.wikipedia.org/wiki/Magnitude_apparente)

On évalue le flux solaire à  $1000 W.m^{-2}$  environ, un calcul d'ordre de grandeur du flux de photons est de  $\frac{\Phi_s}{h\nu} \approx 2.10^{21}$  photons par  $m^2$  et par seconde.

Pour l'étoile la plus faible, ce flux est réduit à environ  $2.10^8$  photons par  $m^2/s$ . Pour une pupille ouverte, de diamètre 2 mm, le nombre de photons qui rentrent dans l'œil par seconde est de l'ordre de plusieurs centaines de photons par seconde. Pour produire une sensation lumineuse stable, il faut exciter les cellules lumineuses tous les dixièmes de seconde environ. Si l'on suppose que l'on excite environ 5 cellules visuelles, chaque cellule visuelle reçoit quelques dizaines de photons ce qui est suffisant pour déclencher un signal nerveux ! Des études plus poussées ont montré que trois photons suffisent pour déclencher un signal nerveux.

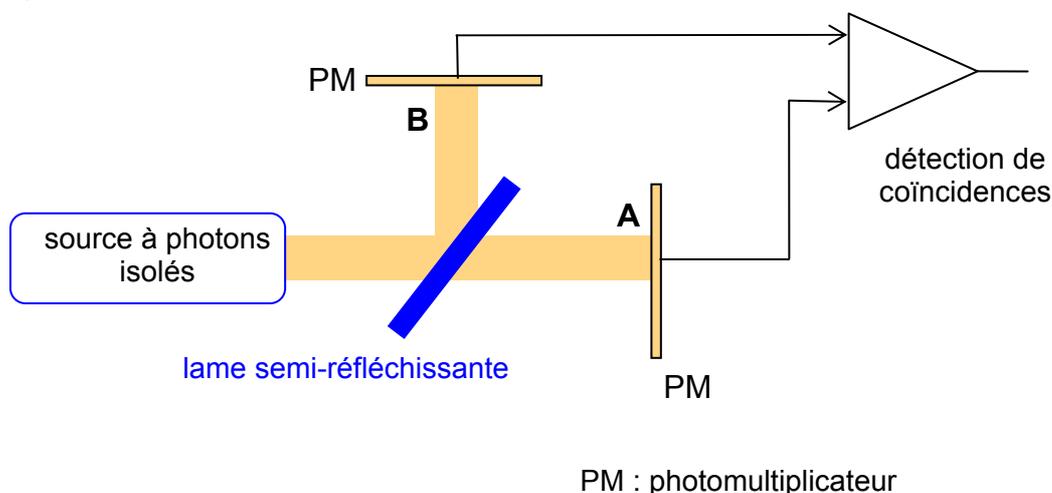
On peut aussi signaler que la mesure de la distance Terre-Lune est réalisée par des tirs Laser réfléchis par des réflecteurs placés sur la Lune, et qu'en moyenne, à cause de deux phénomènes de diffraction de l'onde lumineuse par le télescope puis par le réflecteur lunaire, moins d'un photon sur  $10^{19}$  envoyés est en moyenne détecté. Il est parfaitement possible d'obtenir le bon ordre de grandeur de ce rapport par des estimations rapides.

<sup>5</sup> On peut remarquer qu'il est possible de faire une approche expérimentale du comptage de photons en utilisant un photodétecteur à avalanche.

<sup>6</sup> Jean-Michel Courty et Nicolas Treps « *La lumière, c'est combien de photons ?* » ; Pour la Science Dossier n°53 octobre 2006

## Utilisation d'une lame semi-réfléchissante

L'expérience<sup>7</sup> décrite ci-dessous a été mise en œuvre en 1977 par H. Kimble, M. Dagenais et L. Mandel. Elle utilise une lame semi-réfléchissante et une source à « photons uniques » qui envoie un très faible flux de photons isolés.



Une lame semi-réfléchissante offre à la lumière deux chemins possibles, la transmission (voie A) et la réflexion (voie B). Un photomultiplicateur (PM) transforme de l'énergie lumineuse en signal électrique. Un circuit électronique compte les coïncidences, c'est-à-dire qu'il compte les événements où les deux photomultiplicateurs délivrent simultanément un signal ; une fenêtre temporelle est naturellement ajustée.

L'expérience a montré qu'il n'y avait aucune coïncidence, elle atteste clairement d'une manifestation corpusculaire de la lumière : on peut utiliser l'image corpusculaire classique d'un photon qui est réfléchi ou qui est transmis mais qui ne se scinde pas. Soulignons qu'il ne s'agit que d'une image car le résultat de l'expérience atteste simplement du fait que l'énergie se manifeste soit en A soit en B mais pas à la fois en A et en B. Un modèle ondulatoire de la lumière aurait prédit un résultat non nul pour la mesure du nombre de coïncidence.

## Conclusion

Cette première étude vise à montrer à l'élève qu'au regard de la classification des « objets » de la physique classique, certaines expériences trouvent leur interprétation dans un modèle ondulatoire de la lumière et d'autres dans un modèle corpusculaire de la lumière. C'est le sens qu'il convient de donner à la dualité « onde-particule ». Il faut souligner qu'il existe des situations expérimentales<sup>8</sup> qui ne correspondent à aucune de ces deux images classiques. Soulignons que la physique quantique décrit les phénomènes de manière précise et unique, c'est l'interprétation des résultats qui change. L'onde détermine les propriétés statistiques de la particule, elle « guide » en quelque sorte la particule.

<sup>7</sup>Sous la direction de Gilbert Pietryk ; « *Panorama de la Physique* » page 104 ; Belin 2007

<sup>8</sup> Expérience de Hong, Ou et Mandel en 1987

## II. Onde de matière – Relation de de Broglie

### II.1. Introduction historique

#### Relation de de Broglie

En 1924, Louis de Broglie associe à toute particule matérielle un comportement ondulatoire. Ainsi à une particule de masse  $m$  et de vitesse  $v$ , on associe une onde de longueur d'onde  $\lambda$  donnée par la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{avec } p = mv.$$

Il convient d'insister sur la valeur et l'unité de la constante de Planck qui a été déjà vue en classe de première S :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s. Cela permet à Louis de Broglie de réinterpréter les niveaux d'énergie discrets de l'atome d'hydrogène par l'existence de modes d'ondes stationnaires.

Pour fixer d'emblée des ordres de grandeur<sup>9</sup>, on peut donner la longueur d'onde de de Broglie associée à grain de poussière de masse  $10^{-15}$  kg, de diamètre 1  $\mu\text{m}$  et de vitesse 1 mm/s. On trouve une longueur d'onde de  $6,6 \cdot 10^{-16}$  m, ce qui est négligeable à l'échelle de la taille du grain de poussière. Cela suggère qu'un comportement ondulatoire sera très difficile à mettre évidence pour un objet de taille macroscopique.

Remarquons que lorsque la vitesse devient très faible, l'agitation thermique est à prendre en compte, la longueur d'onde  $\lambda$  de de Broglie se calcule alors par la relation :  $\lambda = \frac{h}{\sqrt{3mk_B T}}$ .

Si l'on considère cette fois un neutron thermique, comme il y en a dans certains réacteurs de centrales nucléaires, de masse  $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg et de vitesse donnée par la relation :  $\frac{1}{2} m_n v^2 = \frac{3}{2} k_B T$  avec  $T = 300$  K, alors la longueur d'onde de de Broglie vaut :  $1,4 \cdot 10^{-10}$  m. Elle l'ordre de grandeur de la distance entre deux atomes ou deux ions dans un réseau cristallin. On peut donc prévoir que le caractère ondulatoire d'un neutron thermique sera révélé lorsqu'il interagira avec un réseau cristallin.

#### Première vérification expérimentale

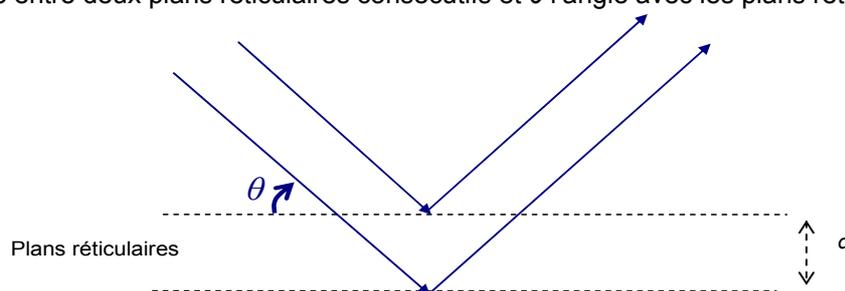
La première preuve expérimentale directe du comportement ondulatoire de la matière est apportée par Davisson et Germer<sup>10</sup> en 1927. L'expérience consiste à faire diffracter un faisceau d'électrons sur un cristal de Nickel. La figure ci-après montre très sommairement le principe de l'expérience où les électrons produits par le filament sont accélérés puis rencontrent une cible en Nickel qui les renvoie.

Davisson et Germer constatèrent que les électrons étaient **diffractés** de la même manière que **les rayons X** selon la loi de Bragg<sup>11</sup> avec, par exemple, un pic d'intensité pour une énergie cinétique  $E_c$  des

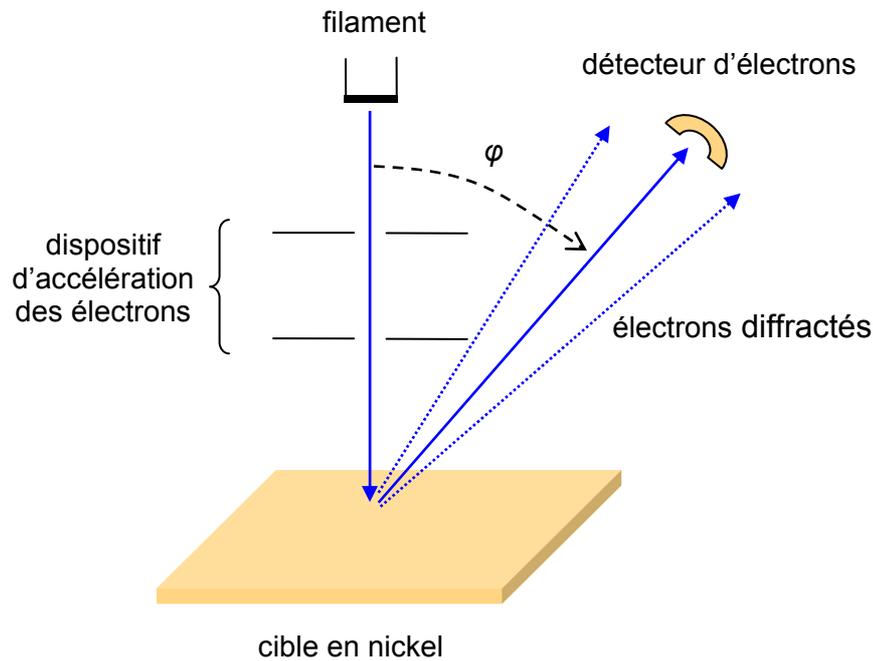
<sup>9</sup> C. Cohen Tannoudji « Mécanique quantique – Tome 1 » Hermann

<sup>10</sup> Pour plus de détails, on peut se référer à l'ouvrage de Thornton et Rex « Physique moderne » de Boeck 2009

<sup>11</sup> La relation de Bragg est une condition d'interférence constructive, elle s'écrit  $2d \sin \theta = n\lambda$ ,  $n$  est un entier,  $d$  représente la distance entre deux plans réticulaires consécutifs et  $\theta$  l'angle avec les plans réticulaires.



électrons de 54 eV et un angle de diffusion  $\varphi$  de  $50^\circ$ . La longueur de de Broglie est donnée par la relation de  $\lambda = \frac{h}{p}$  et  $p$  la quantité de mouvement peut être calculée par la relation  $E_e = \frac{p^2}{2m}$ . L'application numérique donne  $\lambda = 0,167 \text{ nm}$  qui est compatible avec l'analyse théorique utilisant la relation de Bragg.



**Expérience de Davisson et Germer<sup>12</sup> en 1927**

## Commentaires

Une présentation historique est intéressante et sans doute indispensable pour fixer la chronologie des idées et des vérifications expérimentales. Le comportement ondulatoire des électrons se manifeste dans une situation analogue à celle de la diffraction des rayons X par des cristaux, celle-ci n'est pas connue des élèves.

L'analogie n'est donc pas facile à partager avec les élèves et peut-être peut-on se limiter à une simple évocation de cette première vérification ? On peut aussi leur proposer de visualiser un phénomène similaire dans le domaine de l'optique visible en utilisant la diffraction d'un faisceau laser sur la surface d'un CD.

L'utilisation d'une expérience récente, où les liens avec l'aspect ondulatoire classique sont plus faciles à établir, est sans doute préférable.

## II.2. Interférences à deux fentes avec des atomes de néon ultrafroids

### Introduction

Cette expérience<sup>13</sup> récente peut constituer un excellent support pour introduire la notion d'onde de matière. Elle permet de conduire une discussion plus ou moins approfondie des phénomènes observés et d'illustrer pour partie la subtilité de la problématique de la dualité « onde-particule ».

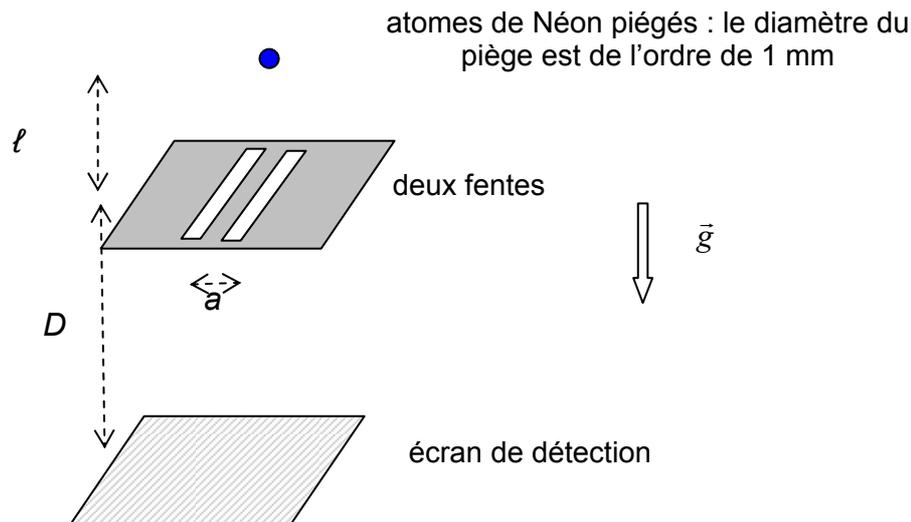
<sup>12</sup> Pour plus de détails on peut se référer à l'ouvrage de Thornton et Rex « *Physique moderne* » de Boeck 2009

<sup>13</sup> F. Shimizu, K. Shimizu, H. Takuma ; « *Double-slit Interference with ultracold metastable neon atoms* » ; Physical Review A ; 1992.

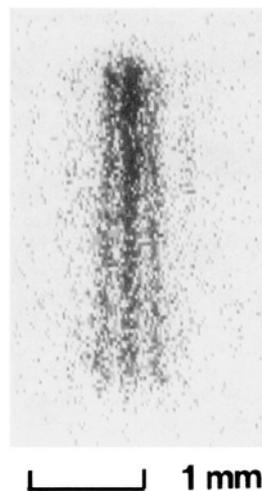
## Le dispositif expérimental

On utilise le dispositif décrit sommairement sur la figure ci-dessous, soulignons qu'il est en réalité très complexe. Il utilise des atomes de Néon piégés et refroidis à une température de 2,5 mK de manière à minimiser leur agitation thermique moyenne. Ils sont portés dans un état métastable grâce à un laser à 598 nm, ils peuvent alors quitter le piège et tombent dans le champ de pesanteur. L'utilisation d'atomes légers et refroidis permet de disposer de valeurs de longueur d'onde de de Broglie plus élevées.

Le piège est situé à une hauteur  $\ell = 76$  mm au dessus de deux fentes séparées d'une distance  $a = 6$   $\mu\text{m}$ . La largeur d'une fente est de 2  $\mu\text{m}$ . Un écran MPC (microchannel plate detector) est placé à une distance  $D = 113$  mm de la double fente et détecte les atomes de Néon avec une résolution de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ . L'ensemble du dispositif est disposé verticalement.



La figure d'interférence obtenue en libérant les atomes du piège, est constituée d'environ 6000 impacts atomiques. Chaque impact est clairement identifié attestant du caractère corpusculaire des entités détectées mais l'ensemble des impacts dessine des franges d'interférences dont la période est égale à 0,23 mm. On a donc une preuve éclatante de la subtilité de la prédiction en physique quantique.



Figure<sup>14</sup> d'interférences obtenue avec des atomes de vitesse initiale approximativement nulle

<sup>14</sup> F. Shimizu, K. Shimizu, H. Takuma ; "Double-slit Interference with ultracold metastable neon atoms" ; Physical Review A; 1992

## Commentaires

### Aspects qualitatifs importants

La discussion suivante s'inspire de celle du livre de J.L. Basdevant<sup>15</sup>.

On peut tout d'abord souligner les analogies avec une figure d'interférences classique obtenue avec de la lumière. Si l'on admet que l'on peut faire arriver les atomes un à un, de manière indépendante, on peut constater, à l'aide par exemple d'une simulation<sup>16</sup>, que la figure d'interférence se construit peu à peu. On peut souligner que ce type de simulation a une visée pédagogique et n'est en aucun cas une simulation de l'expérience réelle. Avec le même objectif, on peut aussi utiliser des vidéos, par exemple dans le cas d'interférence avec un faisceau d'électrons atténué<sup>17</sup>.

On remarque donc :

- que les atomes de Néon ont un impact bien défini au niveau du détecteur et donc qu'ils ne se « scindent » pas.
- que la prédiction du lieu de l'impact est de nature probabiliste celle-ci fait intervenir la longueur d'onde de de Broglie associée à l'atome ainsi que les paramètres géométrique du dispositif. La particule est décrite par « une fonction d'onde ».
- au final les paramètres de la figure d'interférence se calculent en utilisant la longueur d'onde de de Broglie associée à la particule, c'est là qu'intervient le concept d'onde associée à une particule.

L'élève doit être en mesure de calculer la longueur d'onde de de Broglie et de la comparer à une dimension caractéristique du dispositif (ici la distance entre les deux fentes) pour analyser la situation.

### Quelques développements possibles

L'enseignant peut se trouver dans des situations où l'élève désire en savoir davantage et analyse cette expérience avec ses connaissances « classiques ».

- La première hypothèse qu'il peut formuler, c'est que cette distribution résulte d'un état initial imparfaitement connu. On peut lui indiquer que la prédiction en mécanique quantique est par nature probabiliste et ceci même si l'état initial est parfaitement bien défini.
- On peut poursuivre la discussion, en notant que si l'on bouche l'un des deux trous on se rend compte que les franges d'interférence disparaissent...il est donc spectaculaire de noter que le fait d'ouvrir une « porte supplémentaire<sup>14</sup> » empêche la particule d'arriver à certains endroits, cette situation est déjà connue dans le cas de la lumière.
- Avec un regard « classique », la question qu'il est naturel de se poser est de se demander par quel trou est passée la particule. On peut tenter de le savoir en mettant un détecteur optique (un faisceau laser situé devant l'une des deux fentes par exemple). On note alors que les franges d'interférence disparaissent ! Ce n'est plus la même expérience. On en déduit un autre résultat fondamental : **la mesure perturbe le système**.
- Réciproquement, dans l'expérience décrite, il est impossible de savoir par où est passée la particule. On ne peut pas parler de trajectoire au sens classique du terme, on peut savoir où la particule a été émise, où elle est arrivée mais on n'a pas accès aux états intermédiaires.

Dans cette expérience l'atome apparaît comme une entité quantique à part entière qui n'est ni un particule ni une onde au sens classique du terme. Ce sont nos représentations classiques et l'utilisation

<sup>15</sup> J.L. Basdevant ; « 12 leçons de mécanique quantique » ; Vuibert ; 2006

<sup>16</sup> On pourra trouver ce type de ressource dans le CD-ROM qui accompagne le livre de physique quantique de J.L. Basdevant et Jean Dalibard ; « Mécanique quantique » ; Les éditions de l'Ecole Polytechnique 2002.

<sup>17</sup> Une vidéo intitulée « L'interferenza degli elettroni (Merli, Missiroli, Pozzi) » permet d'observer le processus statistique de la formation des franges d'interférences au cours du temps.

d'un vocabulaire issu d'une culture de physique classique qui nous amènent à parler de dualité « onde-particule ».

### Aspects quantitatifs

En dehors des aspects quantitatifs déjà évoqués, il convient d'être prudent dans l'approche semi-quantitative de cette expérience. Il est possible d'évaluer la vitesse  $v_s$  des atomes au niveau des deux fentes ( $v_s = 1,2$  m/s si l'on suppose la vitesse initiale voisine de zéro) et la durée théorique de chute  $t_f$  du piège jusqu'à l'écran de détection ( $t_f = 200$  ms environ) à l'aide d'une approche classique, ce qui a priori n'est pas évident. On peut aussi évaluer la longueur d'onde de de Broglie au niveau des deux fentes ( $\frac{h}{mv_s} \approx 1,6 \cdot 10^{-8}$  m) et ainsi la comparer à la distance  $a$  entre les fentes.

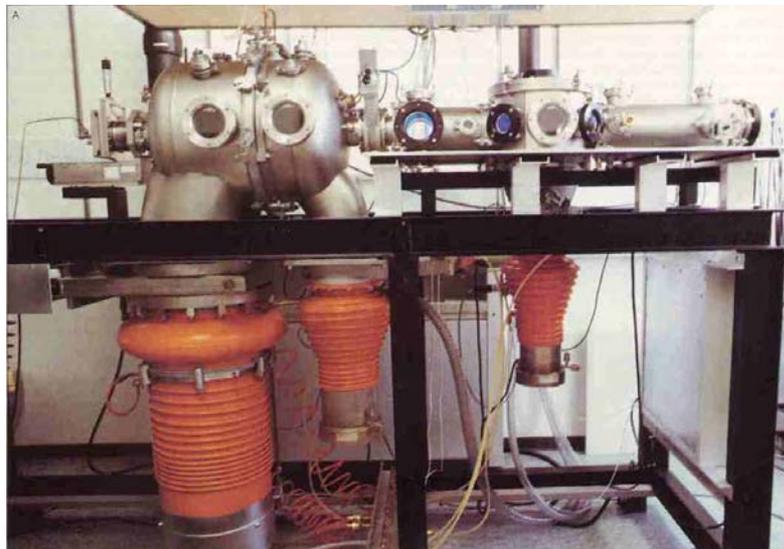
La détermination de l'interfrange  $\Delta x$  est délicate, on peut sensibiliser l'élève au fait que la longueur d'onde de de Broglie varie avec l'altitude et admettre que l'interfrange est donnée par la relation :  $\Delta x = \frac{h}{m v_s} \frac{D}{a} \frac{2(\sqrt{1+\alpha}-1)}{\alpha}$  avec  $\alpha = \frac{2gD}{v_s^2}$ . Cette relation peut être commentée et donner lieu à une évaluation numérique qui donne bien la valeur attendue de 0,23 mm.

## II.3. Exemples

### Expériences<sup>18</sup> des fentes d'Young avec des atomes

#### Le dispositif expérimental

La construction d'un interféromètre à atomes est délicate car ces derniers ne portent pas de charge électrique comme les électrons et ne peuvent pas pénétrer à l'intérieur de la matière comme les neutrons. Le dispositif utilise des atomes d'Hélium dont la vitesse peut être modifiée. La relation de de Broglie, nous indique que l'on fait alors varier directement la longueur d'onde de de Broglie associée. Ici on considèrera que  $\lambda_{DB} = 0,56 \cdot 10^{-10}$  m.



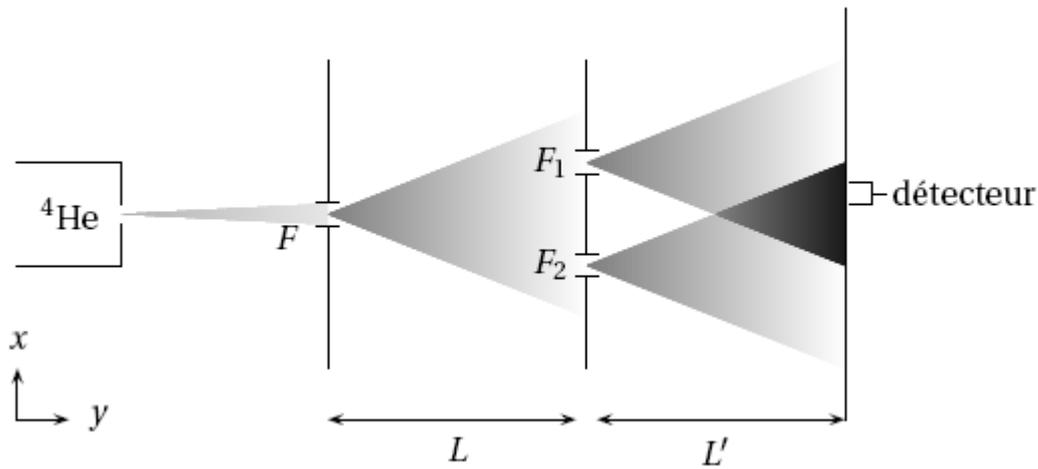
Dispositif expérimental de Carnal et Mlynek.

La source atomique est située à gauche et détection se fait à l'extrémité droite du tube supérieur. Les dispositifs de couleur orange sont des pompes à diffusion permettant d'obtenir un très bon vide dans l'enceinte.

(La Recherche 247 d'octobre 1992)

<sup>18</sup> [3] O. Carnal, J.Mlynek, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 21 (1991).

La figure ci-dessous donne un schéma de principe de l'expérience.



Les atomes rencontrent une première fente  $F$  de largeur  $s_1 = 2 \mu\text{m}$  et de hauteur égale à  $4 \text{ mm}$  réalisée dans une feuille d'or. Puis comme l'indique la figure ci-dessus, ils rencontrent un dispositif à deux fentes de la largeur  $1 \mu\text{m}$ , de hauteur  $2 \text{ mm}$  et distante de  $a = 8 \mu\text{m}$  réalisées également dans une feuille d'or. Les distances  $L$  et  $L'$  valent  $64 \text{ cm}$ .

Le détecteur placé à l'arrière de l'écran compte les impacts des atomes d'hélium. La partie sensible du détecteur a une largeur de  $2 \mu\text{m}$  ; il est déplacé par pas de  $1,88 \mu\text{m}$ . Pour chaque position la durée de comptage est de  $10 \text{ minutes}$ .

### Les résultats

Ils sont présentés sur la figure ci-dessous pour la longueur d'onde de de Broglie  $\lambda_{dB} = 0,56 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ . La figure représente le nombre d'impacts pour une durée de comptage de  $10 \text{ minutes}$  en fonction de la position du détecteur. La ligne en pointillés représente le bruit de fond obtenu lorsque la fente  $F$  est obturée.

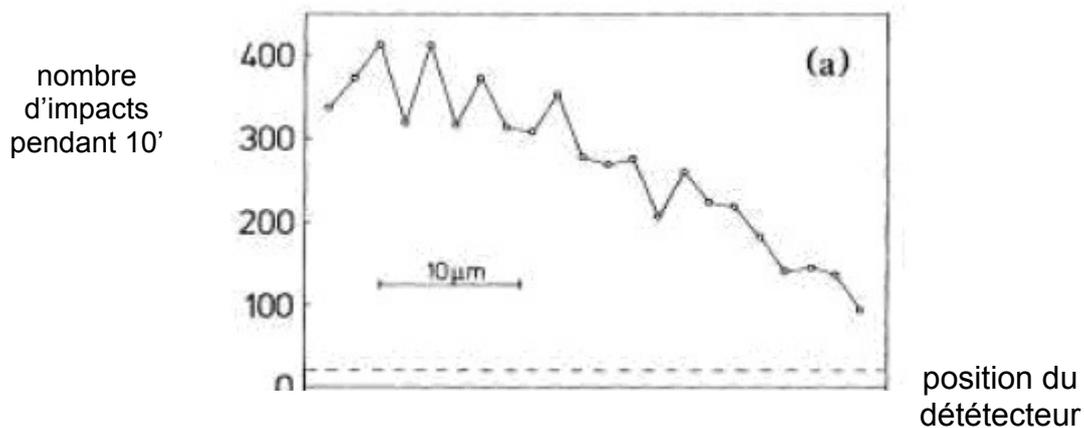


Figure d'interférences<sup>19</sup>

La distance moyenne entre deux maxima est  $\delta x = (4,5 \pm 0,6) \mu\text{m}$ .

<sup>19</sup> [3] O. Carnal, J. Mlynek, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 21 (1991).

## Commentaires

Cette expérience peut être soigneusement analysée avec des élèves.

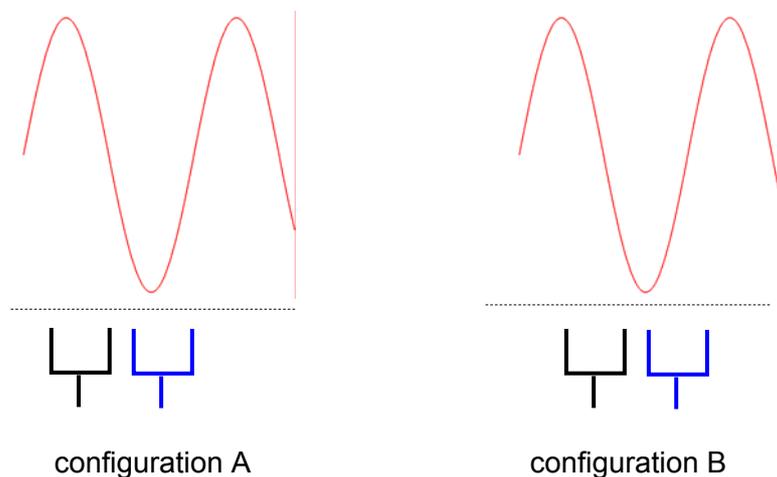
Le premier aspect est fondamental : le comportement ondulatoire au sens classique du terme est révélé par la présence de la fente F (diffraction) et par celle des deux fentes avec le phénomène de d'interférences. La comparaison de la longueur d'onde de de Broglie avec la largeur des fentes indique un rapport de plus de 10000 et pourtant le dispositif expérimental permet parfaitement de visualiser une figure d'interférences<sup>20</sup>. Notons à nouveau que les atomes sont toujours identifiés par des impacts individuels et que la figure d'interférence se construit pas à pas au fur et à mesure de l'accumulation des données.

Il est possible d'évaluer certains ordres de grandeurs avec les élèves et donc de réutiliser les compétences acquises dans la partie du cours sur les ondes :

- à la sortie de la fente F, on peut estimer une dimension caractéristique de la taille de la figure de diffraction au niveau des deux fentes :  $\frac{L\lambda_{DB}}{s_1} \approx 36 \mu m$  environ. Donc si le dispositif est bien centré, les deux fentes  $F_1$  et  $F_2$  distantes de  $8 \mu m$  sont bien placées dans la tache centrale de la figure de diffraction.
- au niveau du détecteur, on peut utiliser l'expression de l'interfrange, étudiée par exemple dans le cadre d'une activité expérimentale d'optique. La valeur calculée donne :  $\frac{\lambda_{DB}L'}{a} \approx 4,5 \mu m$  ce qui est compatible avec la donnée expérimentale  $\delta x = (4,5 \pm 0,6) \mu m$ .

Il est possible également de sensibiliser les élèves à la problématique de la gestion des données expérimentales : évaluation d'incertitude sur les mesures, existence d'un bruit de fond, influence de la taille de la surface active d'un détecteur, aspect peut-être un peu décevant de la figure d'interférence<sup>21</sup>...

Concernant l'influence de la taille de surface active du détecteur, on peut leur faire percevoir la difficulté en s'appuyant sur les schémas suivants :



Les deux figures symbolisent deux situations avec deux positions successives (noire puis bleue) des détecteurs dans le champ d'interférences. La courbe rouge identifie les zones d'impacts probables et celles d'impacts peu probables. Dans la configuration A : le détecteur détecte parfaitement une différence de comptage : la valeur diminue. Dans la configuration B : le détecteur ne détecte aucune variation sensible, le minimum n'est ici pas résolu.

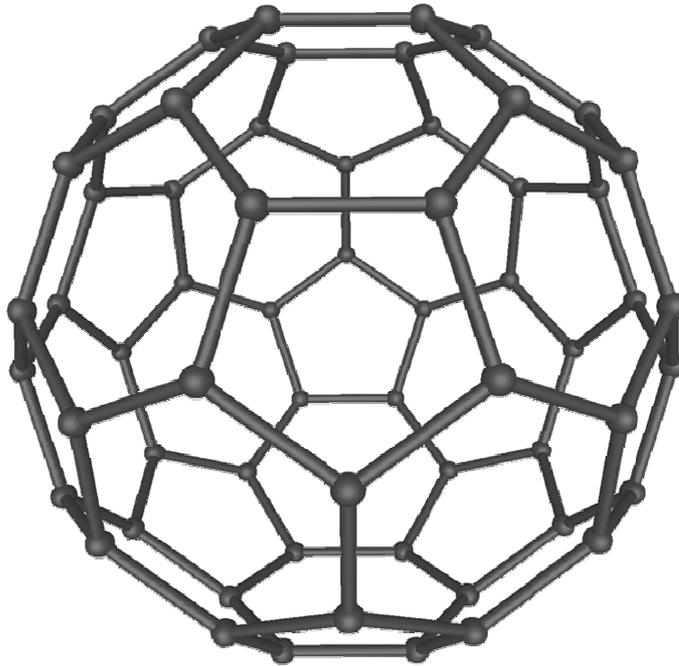
<sup>20</sup> On peut naturellement rencontrer ce type de situation dans le domaine de l'optique.

<sup>21</sup> L'article cité en référence analyse la forme générale de la figure d'interférence.

## Expérience<sup>22</sup> d'interférences avec des molécules de fullerène C<sub>60</sub>

### Présentation

Cette expérience sera décrite brièvement, mais Il est remarquable de noter que qu'une expérience d'interférences utilisant des molécules de fullerène en C<sub>60</sub> a été conduite avec succès dans les années 2000.

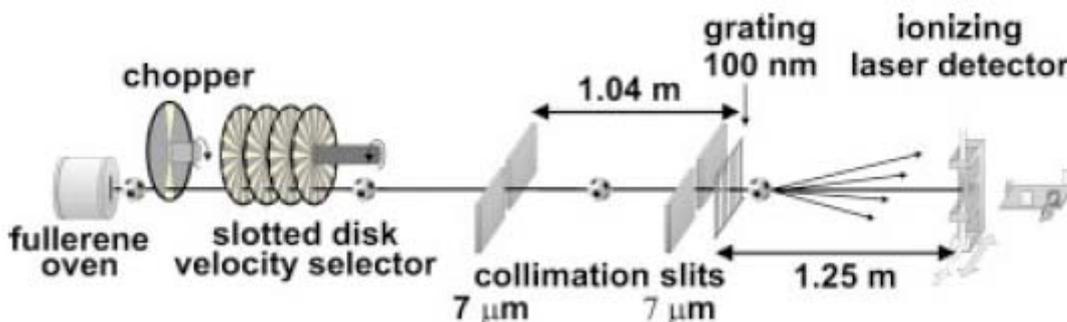


Molécule de fullerène : C<sub>60</sub>

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:C60a.png>

Le dispositif expérimental est décrit sur la figure ci-dessous. Il est constitué d'une source qui contient un gaz constitué de molécules de fullerène C<sub>60</sub> à une température de l'ordre de 900 K, ce qui correspond à une vitesse moyenne  $v_m$  de 200 m/s avec une largeur relative de  $\frac{\Delta v}{v_m} = 60\%$ . La longueur

d'onde de de Broglie associée est donnée par la relation  $\lambda = \frac{h}{mv_m}$ . Avec une masse  $m = 1,2 \cdot 10^{-24}$  kg on trouve  $\lambda = 2,8$  pm. Nous pouvons souligner qu'elle est très petite à l'échelle de la taille de la molécule qui est de l'ordre de 1000 pm.



Interférences avec du C<sub>60</sub> (Am. J. Phys.71 (4), avril 2003)

<sup>22</sup> O. Nairz, M. Arndt, A. Zeillinger ; « Quantum interference experiments with large molecules » A. J. Phys. 71 (4), avril 2003

L'élément diffractant est constitué par un réseau (grating) de pas  $d = 100$  nm, la largeur d'une fente est de l'ordre de 55 nm.

L'observation est réalisée dans un plan situé à une distance  $L = 1,25$  m, le détecteur utilise un laser à argon qui ionise les molécules. La résolution spatiale du détecteur est de l'ordre de  $8 \mu\text{m}$  ce qui est suffisant pour observer la figure d'interférence.

### Les résultats

La figure ci-dessous montre la figure d'interférence observée. Elle fixe également les échelles de distances.

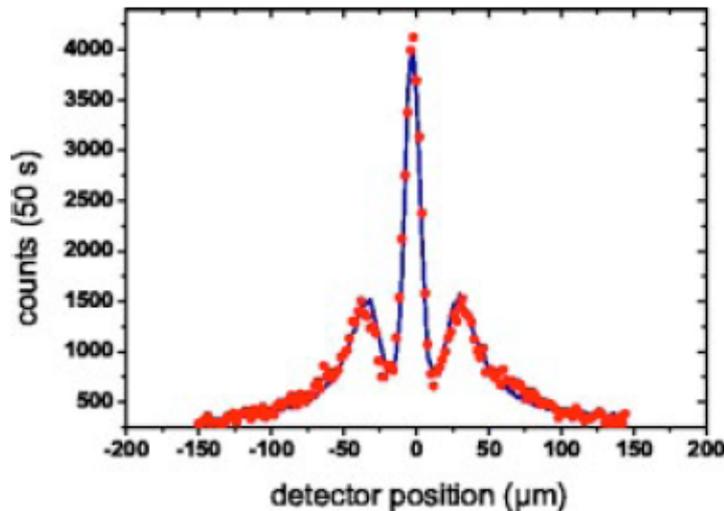


Fig. 6. Far-field diffraction of  $C_{60}$  using a thermal beam of  $\bar{v} = 200$  m/s with a velocity spread of  $\Delta v/v \sim 60\%$ . The absence of higher order interference fringes is due to the poor spectral coherence.

Diffraction avec du  $C_{60}$  (Am. J. Phys.71 (4), avril 2003)

### Commentaires

On retrouve certains éléments déjà évoqués précédemment.

La comparaison de la longueur d'onde de de Broglie avec la distance des fentes indique un rapport de  $10^5$  et pourtant le dispositif expérimental permet parfaitement de visualiser une figure d'interférences. Notons à nouveau que les molécules sont toujours identifiées par des impacts individuels et que la figure d'interférence se construit, pas à pas, au fur et à mesure de l'accumulation des données.

Il est possible d'évaluer certains ordres de grandeur avec les élèves et donc de réutiliser les compétences acquises dans la partie du cours sur les ondes. Pour l'évaluation de la distance entre les deux pics successifs, il faut utiliser la condition d'interférences constructives des réseaux, qui n'est pas au programme, mais que les élèves peuvent s'approprier. Elle donne une distance entre les pics d'intensité de  $\frac{\lambda L}{d} \approx 35 \mu\text{m}$ . Ce qui est conforme aux données de la figure précédente.

On peut enfin souligner que le nombre de pics que l'on peut visualiser est limité en raison de la grande dispersion des vitesses. Il est possible d'améliorer cet aspect en sélectionnant un domaine plus étroit de vitesses.

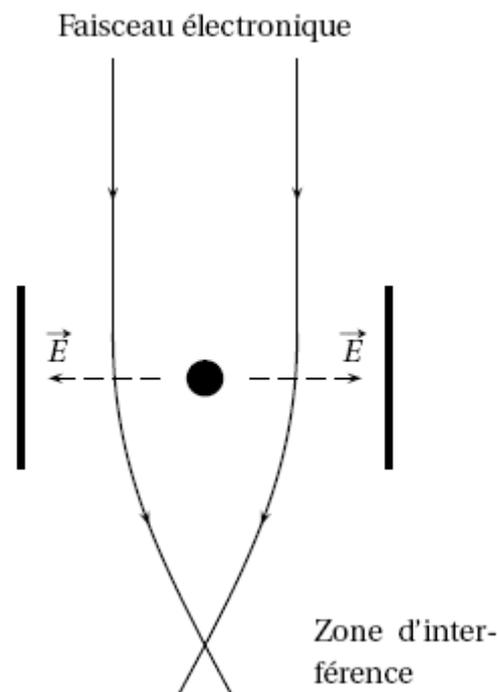
## Interférences avec des électrons

### Présentation

Des expériences d'interférences à deux fentes avec des électrons<sup>23</sup> ont été réalisées dès les années 1960. On présente ici l'expérience de Tonomura<sup>24</sup>, qui peut constituer un support intéressant pour présenter la notion de dualité onde-particule.

### Le dispositif expérimental

Des électrons, émis par une source identique à celle d'un microscope électronique, sont accélérés sous une différence de potentiel de 50 kV, puis dirigés vers un ensemble de trois électrodes. Une électrode centrale cylindrique, de diamètre inférieur au micromètre, est portée à un potentiel supérieur de 10 V à celui de deux électrodes planes disposées latéralement. La distance entre les deux électrodes latérales est de 10 mm.



Le faisceau électronique est ainsi divisé en deux faisceaux, déviés dans des sens opposés. Un détecteur est placé dans la zone de recouvrement des deux faisceaux. L'impact d'un électron en un point du détecteur produit des photons (par fluorescence), qui sont ensuite multipliés, détectés et localisés. La position de l'impact d'un électron sur le détecteur peut ainsi être mesurée.

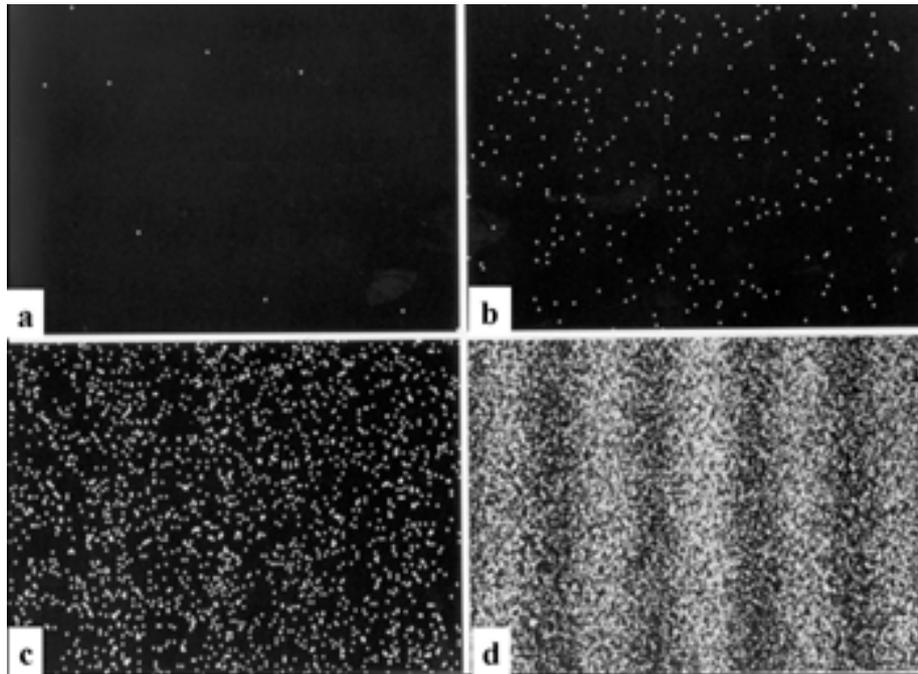
Le flux d'électrons est contrôlé. Il est égal à  $10^3$  électrons par seconde, ce qui correspond à un courant d'intensité  $1,6 \cdot 10^{-16}$  A. Etant donné la vitesse des électrons, cela correspond à une distance moyenne entre deux électrons consécutifs de l'ordre de 150 km, alors que la distance entre la source et le détecteur est de 1,5 m. L'on est ainsi assuré qu'il n'y a qu'un seul électron en transit dans le dispositif. Mieux encore : les électrons sont détectés un par un puisque, lorsqu'un électron est détecté, le suivant n'a même pas encore été émis.

<sup>23</sup> C. Jönsson, *Zeitschrift für Physik*, **161**, 454 (1961).

<sup>24</sup> A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kasawaki, H. Esawa, *Am. J. Phys.*, **57**, 117 (1989).

## Les résultats expérimentaux

Les photographies suivantes révèlent les impacts des électrons sur le détecteur à différents instants. Le nombre d'électrons détectés augmente de la photographie (a) à la photographie (d).



Nombre d'électrons détectés : 8 (a) ; 270 (b) ; 2000 (c) ; 60000 (d)

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doubleslitexperiment\\\_results\\\_Tanamura\\\_1.gif?uselang=fr](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Doubleslitexperiment\_results\_Tanamura\_1.gif?uselang=fr)

Les auteurs de l'article ont publié une vidéo révélant les impacts successifs des électrons et qui peut être exploitée en classe (<http://www.hitachi.com/rd/research/em/movie.html>).

## Commentaires

### Aspects qualitatifs

On retrouve les mêmes éléments que pour les interférences avec des atomes de néon ultrafroids, qui permettent de discuter la notion de dualité « onde-particule ».

- Les électrons sont émis puis détectés individuellement, comme des particules localisées. Ils « survivent » à leur passage dans le dispositif.
- L'examen des photographies (a), (b) et (c) pourraient laisser penser que le point d'impact d'un électron donné est complètement aléatoire. La photographie (d) montre au contraire que les impacts ne se répartissent pas de façon uniforme. L'impact d'un électron est plus probable en certains points qu'en d'autres.
- Le fait que les électrons soient émis un par un est important. La figure d'interférence observée sur la photographie (d) ne peut donc ne pas résulter d'un effet collectif ou d'une interaction entre plusieurs électrons qui seraient en transit ensemble dans le dispositif. Elle résulte bien de la distribution des impacts des électrons selon une loi de probabilité particulière. Cette loi de probabilité, tout comme la figure d'interférence, sont caractérisées par la longueur d'onde de de Broglie des électrons et par les caractéristiques géométriques du dispositif. On associe à l'électron une fonction d'onde.

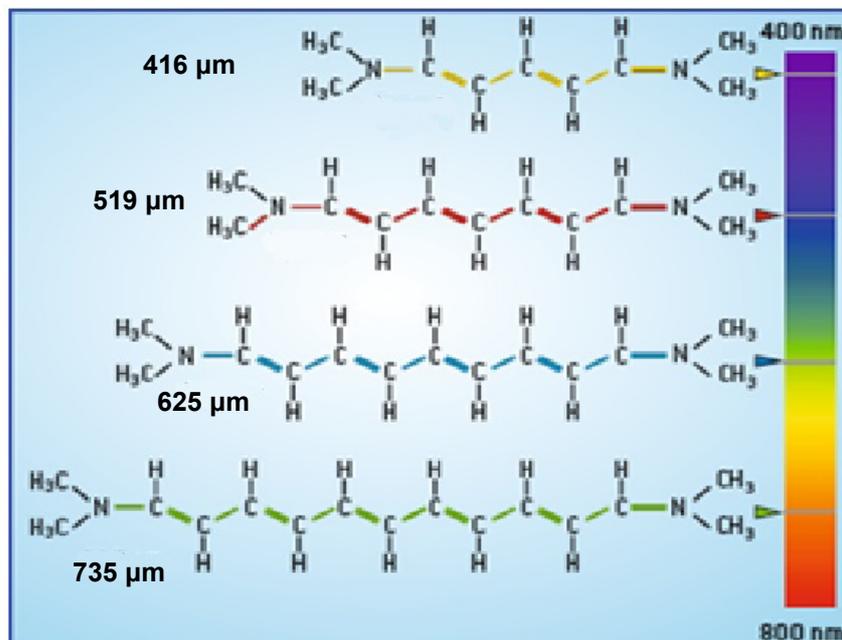
- L'état initial des électrons diffère très peu d'un électron à l'autre. Si les électrons se comportaient comme des particules obéissant aux lois de la mécanique classique, leurs points d'impact devraient se regrouper au voisinage du point prévu par les lois de la mécanique classique. Ce n'est manifestement pas ce que montrent les photographies (a) et (b). Cela doit être un motif d'étonnement pour les élèves. La notion de trajectoire n'a pas de sens dans cette expérience. Les états intermédiaires d'un électron, entre son émission et sa détection, ne sont pas connus. Par exemple, à la question de savoir si un électron est passé d'un côté ou de l'autre de l'électrode cylindrique, on n'est pas en mesure de pouvoir apporter une réponse. Toute tentative de mesure permettant de répondre à cette question se solde, dans cette expérience, par une disparition de la figure d'interférence.

### Aspect quantitatif

Si cette expérience est un bon support pour présenter la notion de dualité « onde-particule », son analyse quantitative est limitée. Comme les électrons, accélérés sous 50 kV, sont relativistes, le calcul de la longueur d'onde de de Broglie n'est accessible aux élèves qu'à la condition qu'on leur donne la quantité de mouvement des électrons. Son ordre de grandeur peut être discuté, et comparé aux dimensions caractéristiques du dispositif.

## Présentation

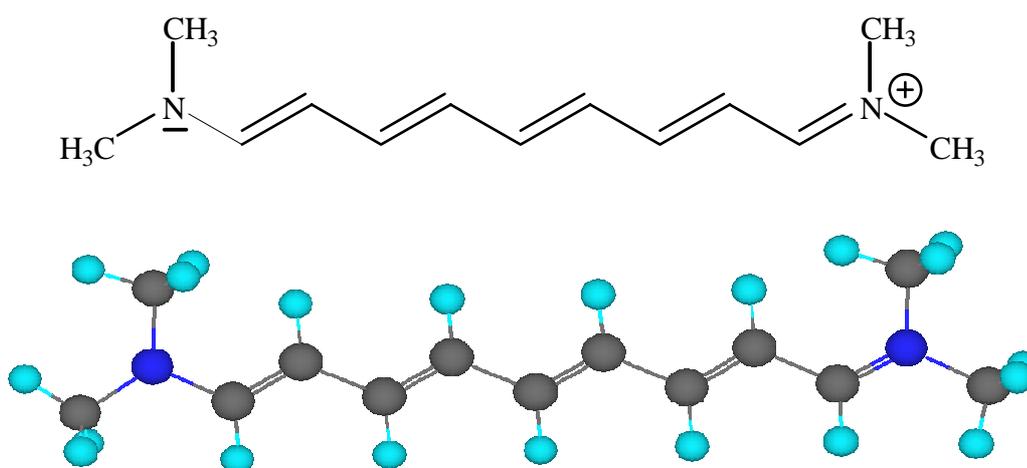
Les cyanines, colorants organiques très répandus, présentent une chaîne carbonée linéaire. On se propose d'analyser la couleur de ces molécules en utilisant un modèle de la boîte quantique<sup>26</sup>. On attribue les propriétés optiques dans le domaine de la lumière visible au seul nuage d'électrons  $\pi$ .



Les cyanines : longueurs d'onde absorbées (document Pour la Science – Mai 2011)

Dans la version la plus simple, on impose aux électrons  $\pi$  de limiter leur mouvement à une seule dimension le long de la chaîne, sur un segment de longueur  $L$ . Ce segment constitue une boîte quantique à une dimension, de longueur  $L$  dans laquelle sont confinés les électrons  $\pi$ .

On s'intéresse à la cyanine dont la chaîne possède 9 atomes de carbone et deux atomes d'azote.



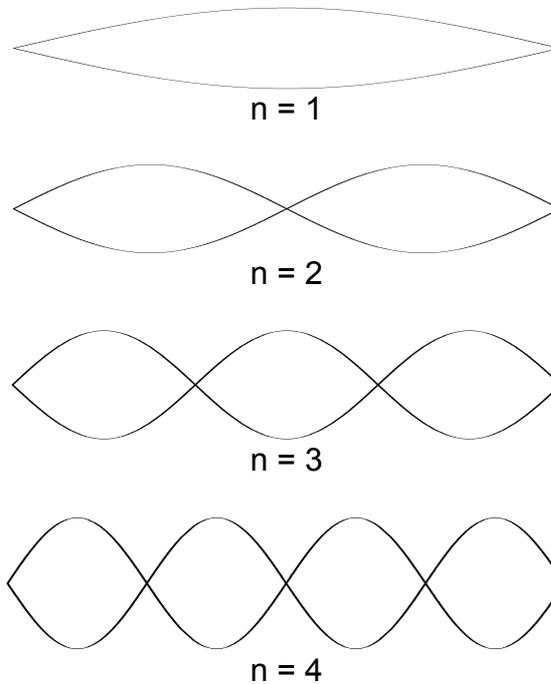
<sup>25</sup> J.M. Courty et Edouard Kierlik ; « Des électrons en boîte pour donner des couleurs » ; Pour la Science- n°403 – Mai 2011

<sup>26</sup> On pourra consulter sur ce thème le livre de Libero Zuppiroli et Marie-Noëlle Bussac « Traité des couleurs » au Presses polytechniques et universitaires romandes.

Pour estimer la longueur, il convient de prendre en compte les deux atomes d'azote ; il suffit pour cela de multiplier le nombre de liaisons par la valeur de la longueur de liaison voisine de 0,14 nm. On estime enfin que la boîte contient ainsi 10 électrons.

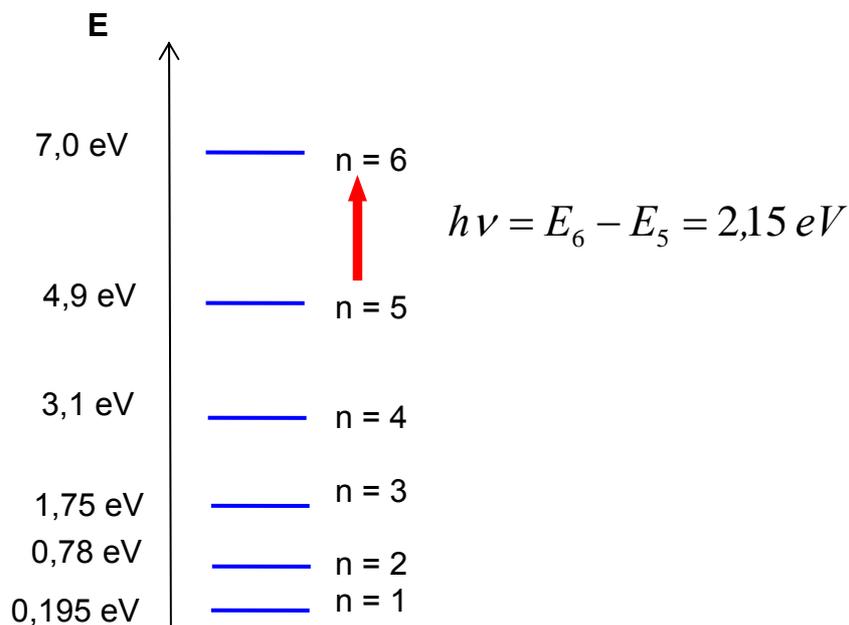
On suppose que les électrons possèdent uniquement de l'énergie cinétique  $E = E_c = \frac{p^2}{2m}$ .

Comme pour les modes propres d'une corde fixée à ses extrémités, le confinement induit une quantification des longueurs d'onde de l'onde de matière associée aux électrons ; les longueurs d'onde de Broglie sont fixées par la relation :  $\lambda_{DB} = \frac{2L}{n}$  où  $n$  est un entier.



Compte tenu de la relation de de Broglie  $\lambda_{DB} = \frac{h}{p}$ , les niveaux d'énergie possibles sont discrets et

fixés par la relation :  $E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$ . On calcule aisément les valeurs des 6 premiers niveaux d'énergie.



Compte tenu du principe de Pauli, l'absorption se produit entre les niveaux 5 et les niveaux 6, ce qui correspond à 2,15 eV et à une longueur d'onde lumineuse de 575 nm donc à une absorption dans le jaune d'où la couleur bleue.

La valeur expérimentale est de 625 nm, l'accord est donc raisonnable, compte-tenu de l'extrême simplicité du modèle.

### Commentaires

Cette activité permet d'utiliser la relation de de Broglie dans une situation où la particule est confinée et donc de présenter la quantification de l'énergie dans la matière, notion déjà abordée en classe de première. C'est pour l'élève une première découverte de l'origine de la quantification de l'énergie dans la matière.

Ce thème est aussi l'occasion de réutiliser des connaissances de la classe de première sur la relation  $\Delta E = h\nu$  et d'évoquer à nouveau la problématique de la couleur d'un objet.

Naturellement, il est clair que l'analogie avec les modes propres d'une corde vibrante n'est pas immédiate pour les élèves, mais peut faire l'objet d'une présentation qualitative dans la partie analyse spectrale de l'étude des ondes. On peut indiquer que l'électron ne pouvant pas sortir de la molécule, l'onde associée doit être nulle en dehors de celle-ci, elle s'annule donc aux deux extrémités de la molécule ; pour la corde l'amplitude de vibration s'annule également aux deux points de fixation. Enfin, il convient d'être vigilant sur la possible confusion entre les différentes ondes présentes dans cette problématique.

Remarquons, pour finir, que, pour l'absorption de l'onde lumineuse, la présentation utilise la notion de photon, la lumière vue sous son aspect corpusculaire que l'on caractérise ensuite par sa longueur d'onde.

## Explorer la matière<sup>27</sup>

### Présentation

Pour sonder des particules cibles de plus en plus petites, on utilise des particules dont les énergies cinétiques sont de plus en plus élevées.

Les premières expériences, effectuées par Rutherford, utilisaient des particules  $\alpha$  d'environ 5 MeV issues de sources radioactives. La longueur d'onde de de Broglie est :

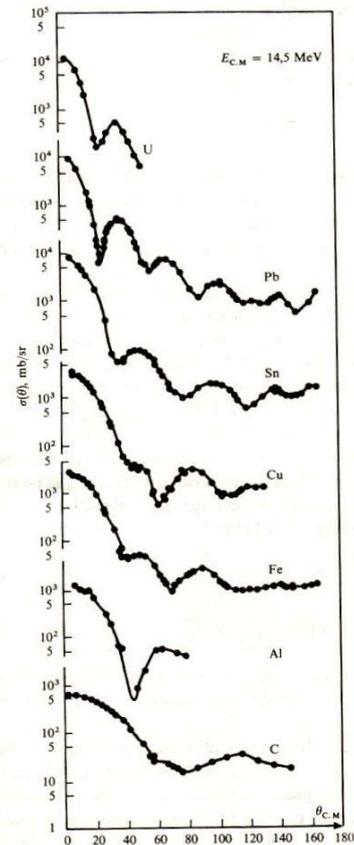
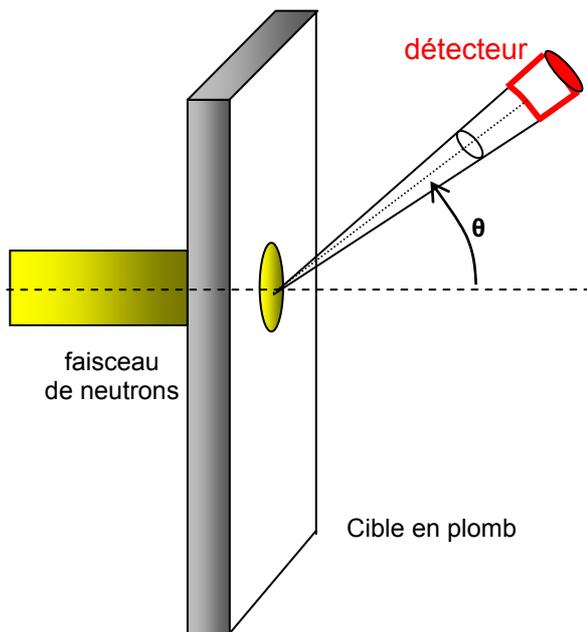
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} \approx 6,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Elle est de l'ordre de grandeur du rayon  $R$  des noyaux.

On peut aussi utiliser des neutrons, par exemple de 14,5 MeV pour lesquels la longueur d'onde de de Broglie est de  $\lambda = 7,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ . On observe alors nettement la présence d'une figure de diffraction avec des « anneaux ». L'ouverture de la tache centrale est fixée par l'expression :  $\frac{\lambda}{R}$  où  $R$  varie suivant la loi

$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$  avec  $R_0$  de l'ordre de  $1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  et  $A$  représentant le nombre de masse de l'atome étudié.

<sup>27</sup> On pourra se référer à l'ouvrage de L. Valentin « *Le monde subatomique* » ; Hermann, 1986



Distribution angulaire des neutrons diffusés élastiquement par quelques noyaux<sup>28</sup>

### Commentaires

Il convient de noter que les résultats expérimentaux, utilisant la notion de section efficace différentielle de collision, doivent être adaptés pour une utilisation avec des élèves de TS.

## II.4. Conclusions

### A propos de la dualité « Onde-particule »

J.L. Basdevant, dans son ouvrage « 12 leçons de mécanique quantique » dit à propos d'un objet quantique : « Et cet être quantique, dans des conditions expérimentales données, pourra apparaître à des esprits initiés seulement aux concepts classiques soit comme une onde soit comme un particule newtonien, ce qui semble paradoxal ». Puis il poursuit de la manière suivante : « Il est complètement faux de parler de « dualité » onde-particule en sous-entendant que la physique est tantôt l'un tantôt l'autre. [...] On sait fabriquer expérimentalement des états quantiques bien définis qui ne sont ni des ondes ni des particules. »

Au niveau des compétences exigibles sur ce thème, l'élève de TS, doit d'une part « Connaître et utiliser la relation  $p = h/\lambda$  » et d'autre part savoir « Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif ». Il devra donc être en mesure, après avoir calculé la longueur d'onde de de Broglie associée à une particule, de la comparer à une grandeur pertinente du dispositif pour savoir s'il peut s'attendre à observer des phénomènes qui pour lui relèvent de ce qu'il a appris sur les ondes avec sa culture classique. Comme nous l'avons souligné cette comparaison est déjà délicate et constitue un objectif ambitieux.

Il est sans doute souhaitable de lui indiquer qu'une nouvelle théorie est nécessaire pour bien décrire ces faits expérimentaux : c'est l'objet de la théorie quantique.

<sup>28</sup> de L. Valentin « *Le monde subatomique* », page 26, Hermann, 1986

Notons enfin que l'enseignant dispose actuellement d'expériences modernes et simples dans leurs principes qui permettent de présenter la problématique de manière attractive et efficace.

#### A propos de la prévision probabiliste

L'utilisation de vidéos ou de simulations<sup>29</sup> permet l'observation de la réalisation progressive de la figure d'interférences obtenue en émettant le rayonnement photon par photon, ou bien la matière particule par particule. Comme l'indiquent les commentaires du programme, cette observation « souligne l'étrangeté éventuelle des phénomènes quantiques pour le sens commun ». L'élève comprend ainsi que les prédictions sont par nature probabilistes au niveau individuel. Certaines applications, comme la cryptographie quantique, s'appuient sur cette « incertitude quantique ».

Par contre la loi des grands nombres permet néanmoins de prévoir précisément le comportement des grands ensembles, et ainsi par exemple de caractériser avec précision une figure d'interférences, de vérifier la loi de Malus sur la polarisation ou bien que d'étudier la division de l'intensité lumineuse par une lame semi-réfléchissante.

---

<sup>29</sup> On pourra trouver ce type de ressource dans le CD-ROM qui accompagne le livre de physique quantique de J.L. Basdevant et Jean Dalibard ; « Mécanique quantique » ; Les éditions de l'école polytechnique 2002.

# Annexe 1 : le programme et les commentaires

## Dualité onde-particule

<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 $p = h/\lambda$ . 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.

## Dualité onde-particule : introduction au programme de TS

La dualité onde-corpuscule est une formulation qui s'applique aux manifestations du photon, qui se comporte soit comme une onde, soit comme une particule, selon le contexte expérimental considéré. Mais elle ne doit pas décrire la nature intrinsèque du photon lui-même, qui n'est ni une onde, ni une particule, mais l'archétype d'un objet quantique, appelé parfois « quanton » par les scientifiques.

L'occasion doit pouvoir être saisie d'une similitude des propriétés des ondes de matière et des ondes électromagnétiques, comme dans le cas des électrons et des rayons X. Une illustration naturelle et nécessaire en est celle du microscope électronique où  $p = h/\lambda$ , soit  $\lambda = h/p$ , rapportée au phénomène de diffraction, explique la nécessité d'explorer la matière par des particules ou du rayonnement de longueur d'onde nettement plus petite que la taille des objets observés.

L'observation (vidéo) de la réalisation progressive de la figure d'interférences obtenue en émettant le rayonnement photon par photon, ou la matière particule par particule, souligne l'étrangeté éventuelle des phénomènes quantiques pour le sens commun. Elle est une illustration parmi d'autres de l'aspect probabiliste de la réalité quantique, comme peut l'être la désintégration radioactive (cas des muons évoqués plus haut). L'incertitude associée aux phénomènes quantiques, comme sur l'instant auquel se produit une désintégration, ne doit pas laisser croire que toutes les mesures physiques à ce niveau sont incertaines. Ainsi, l'énergie des niveaux quantiques stables peut être connue avec une précision exceptionnelle (de l'ordre de  $10^{-13}$  par exemple pour le premier niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène !).

Si l'occurrence des phénomènes quantiques individuels ne peut être connue avec précision, la loi des grands nombres permet néanmoins de prévoir précisément le comportement des grands ensembles, c'est-à-dire des systèmes macroscopiques. Il faut bien voir alors que la limite de la précision dans leur connaissance réside dans l'acte de mesure lui-même, alors qu'elle est intrinsèque au niveau microscopique, en raison du caractère probabiliste de la réalité quantique.