

Dualité onde-corpuscule

Nous avons expliqué au chapitre O3 la notion de dualité onde-corpuscule pour la lumière. Les documents de ce dossier ont pour but de montrer comment ce concept s'étend aussi au domaine de ce que l'on connaît comme étant la matière.

L'analyse de ces documents constitue la base du cours du chapitre AM 1 « Dualité onde-corpuscule et quantification de l'énergie ». Ils seront largement commentés en classe, mais leur lecture attentive préalable est indispensable. Votre travail de préparation sera vérifié.

Le dossier s'appuie notamment sur une vidéo : les liens du document pdf mis en ligne sur le site de la classe sont cliquables, et un lien direct vers la vidéo y est donné.

- ▷ Relire en intégralité le **paragraphe III du chapitre O3** à propos des photons et de la dualité onde-corpuscule pour la lumière.
 - Citer une expérience montrant la nature ondulatoire de la lumière. Comment cela se manifeste-t-il concrètement ?
 - Citer une expérience montrant la nature corpusculaire de la lumière. Comment cela se manifeste-t-il concrètement ?
 - Citer une expérience montrant la dualité onde-corpuscule pour la lumière.
 - Définir la dualité onde-corpuscule.
- ▷ Le **document 1** est une introduction, à lire à titre culturel.
- ▷ Analyse du **document 2** :
 - Sur le schéma de l'expérience, identifier clairement les deux faisceaux qui interfèrent.
 - Justifier par un calcul d'ordre de grandeur qu'il ne peut y avoir au plus qu'un seul électron dans le dispositif à chaque instant.
 - Interpréter le résultat de l'expérience par analogie avec les conclusions du chapitre O3 sur les fentes d'Young optiques. Pourquoi est-il légitime de parler d'onde de matière ?
- ▷ Le **document 3** sera étudié en classe et il n'est pas nécessaire de le lire dans un premier temps.

Document 1 : Qu'est-ce que la mécanique quantique ?

La mécanique quantique est la branche de la physique qui a pour objet d'étudier les phénomènes fondamentaux à l'œuvre dans les systèmes physiques, tout particulièrement à l'échelle atomique et subatomique et/ou à très basse température.

Elle fut introduite au début du XX^e siècle afin de résoudre différents problèmes que la physique classique échouait à expliquer, comme le rayonnement du corps noir, l'effet photo-électrique, ou l'existence des raies dans les spectres d'émission. Les noms les plus célèbres associés à ces débuts sont ceux de Max Planck, Albert Einstein, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Louis de Broglie, suivis plus tard notamment par Paul Dirac ou encore Enrico Fermi. Au cours de ces développements, la mécanique quantique se révéla être très féconde en résultats et en applications diverses. Elle permit notamment d'élucider le mystère de la structure de l'atome, et plus globalement elle s'avéra être le cadre général de description du comportement des particules élémentaires, jusqu'à constituer le socle de la physique moderne.

La mécanique quantique est également connue pour les difficultés conceptuelles qu'elle soulève, et son interprétation physique pose de vraies questions philosophiques. Parmi ces concepts à qui l'on donne parfois un statut quasiment mystique, citons la dualité onde corpuscule, la superposition quantique, l'intrication quantique (et le célèbre paradoxe du chat de Schrödinger) ou encore la non-localité.

Plus prosaïquement, la physique quantique au sens large est aujourd'hui un domaine de recherche très actif sur lequel travaillent de très nombreux chercheurs du monde entier. Les sujets de recherche les plus modernes concernent par exemple le cryptage quantique de communications, la réalisation potentielle d'un ordinateur quantique, ou encore l'électronique quantique.

La France est l'un des pays en pointe sur ces recherches, notamment sur le plan expérimental. Les plus grands centres de recherche se trouvent en région parisienne, sur le campus de Saclay et à l'École Normale Supérieure de Paris notamment, et en région grenobloise où sont construits plusieurs grands équipements utilisés par des chercheurs

du monde entier. Plusieurs chercheurs français ont été récompensés du prix Nobel pour leurs travaux sur la mécanique quantique. Les plus récents sont Serge Haroche en 2012 « pour les méthodes expérimentales révolutionnaires qui ont permis la mesure et la manipulation de systèmes quantiques individuels », Albert Fert en 2007 « pour la découverte de la magnétorésistance géante », et Claude Cohen-Tannoudji en 1997 « pour le développement de méthodes permettant de refroidir et piéger des atomes avec la lumière laser ».

Document 2 : Interférences d'électrons

Il a été montré que la lumière, initialement connue seulement comme une onde, pouvait présenter un comportement de type particule lorsqu'elle était détectée. Elle présente donc un double caractère : on parle de dualité onde-corpuscule. Ce constat amène à se demander si des objets connus comme des corpuscules peuvent également être décrits comme des ondes. L'expérience décrite dans ce document aborde cette question pour des électrons. Elle a été réalisée en 1989 par les laboratoires d'Hitachi¹.

Il s'agit d'une expérience de type « fentes d'Young », schématisée figure 1. 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. Le flux d'électrons émis par la source est contrôlé, de l'ordre de 10^3 électrons par seconde, ce qui correspond à un courant d'intensité 10^{-16} A. 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. La distance entre la source d'électrons et le détecteur est de 1,5 m, les électrons se déplaçant dans le dispositif à environ 10^8 m · s⁻¹.

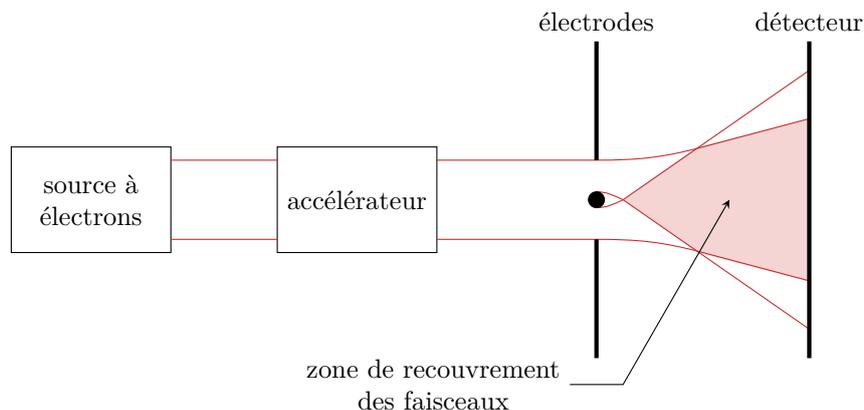


Figure 1 – Expérience d'interférences d'électrons.

Le faisceau électronique est ainsi divisé en deux faisceaux, déviés dans des sens opposés, et se recouvrant dans une zone où un détecteur est placé. En pratique, l'impact d'un électron en un point du détecteur produit de la lumière de fluorescence, qui est ensuite amplifiée et filmée, ce qui permet de repérer l'impact d'un électron sur le détecteur, voir la vidéo et la capture d'écran figure 2. On observe les électrons arriver un par un sur le détecteur. Cependant, lorsqu'un nombre suffisant d'électrons a atteint le détecteur, on constate qu'ils ne sont pas équirépartis. La probabilité qu'un électron arrive en un point du détecteur est donnée par une figure d'interférences.

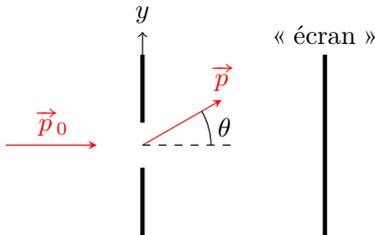


Figure 2 – Capture d'écran de la vidéo de l'expérience. Vidéo réalisée par A. Tonomura et ses collaborateurs d'Hitachi en 1989, à consulter sur <https://www.youtube.com/watch?v=ZJ-OPBRuthc>.

1. Article original dont le document est inspiré : A. Tonomura et al. « Demonstration of single electron buildup of an interference pattern. » American Journal of Physics, volume 57, février 1989.

Des interférences de même type ont été observées avec des objets de plus en plus gros : d'abord des neutrons, puis des atomes de rubidium, et même désormais des molécules comme les fullerènes (C_{60} , masse molaire $720 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) ou depuis 2012 des colorants de la famille des phthalocyanines² (la plus grosse étant de formule $C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$, masse molaire $1,2 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Document 3 : Diffraction d'électrons et inégalité d'Heisenberg



L'inégalité d'Heisenberg fournit une interprétation naturelle aux expériences de diffraction d'électrons. Intéressons-nous à celle réalisée en 2012 par R. Bach et ses collaborateurs³. Les auteurs avaient pour objectif de reproduire exactement l'expérience des fentes d'Young historique, mais avec des électrons. Les difficultés expérimentales à surmonter expliquent que la réalisation soit si récente. On s'intéresse au passage d'un électron de quantité de mouvement $\vec{p}_0 = m\vec{v}_0$ au travers d'une fente de largeur a dans la direction y .

Initialement, avant le passage par la fente, la quantité de mouvement de l'électron est très bien connue mais sa position ne l'est pas. L'indétermination est donc forte sur la position, et faible sur la quantité de mouvement.

Si un électron est détecté sur « l'écran », c'est bien sûr qu'il est passé au travers de la fente, ce qui donne une information sur sa position avec une indétermination d'au plus $\Delta y \simeq a$. Puisque l'on gagne en information sur la position, il y a nécessairement perte d'information sur la quantité de mouvement p_y pour respecter l'inégalité d'Heisenberg. L'indétermination sur la quantité de mouvement est donc

$$\Delta p_y \sim \frac{\hbar}{\Delta y} \sim \frac{\hbar}{a}.$$

En d'autres termes, suite au passage par la fente, différents électrons présentent une quantité de mouvement différente en projection sur la direction y , ce qui n'était pas le cas avant la fente où $p_{0,y} = 0$. Ainsi, p_y peut prendre toutes les valeurs entre $-\Delta p_y$ et $+\Delta p_y$. En considérant des petits angles,

$$p_y = p_0 \sin \theta \simeq p_0 \theta \quad \text{d'où} \quad \Delta p_y \simeq p_0 \Delta \theta.$$

On aboutit enfin à

$$\Delta \theta \sim \frac{\hbar}{a p_0}.$$

Comme d'après la relation de de Bröglie $p_0 = h/\lambda_0$ on retrouve alors une relation bien connue,

$$\Delta \theta \sim \frac{\lambda_0}{a},$$

qui donne l'ordre de grandeur de la largeur angulaire du cône de diffraction d'une onde de longueur d'onde λ . Ainsi, le principe d'indétermination permet d'interpréter la diffraction des ondes de matière.

Dans le cas de l'expérience mentionnée plus haut, les fentes ont pour largeur 62 nm et le faisceau d'électrons est émis avec une énergie de 600 eV, ce qui correspond à une longueur d'onde de de Bröglie de 50 pm. L'ouverture angulaire de la figure de diffraction est prévue comme étant de l'ordre de $8 \cdot 10^{-4}$ rad. Le dispositif d'acquisition est trop complexe pour être détaillé ici, on admettra que tout se passe comme si la figure de diffraction était enregistrée par une cellule sensible de taille apparente environ 1 mm située à 25 cm de la double fente. Cette cellule permet d'acquérir un champ angulaire d'environ $4 \cdot 10^{-3}$ rad, et donc de voir la figure de diffraction dans son ensemble.

2. Si cela vous intéresse, une vidéo de l'expérience est à consulter sur https://www.youtube.com/watch?v=NUS6_S1KzC8.

3. Article original dont le document est inspiré : R. Bach et al. « Controlled double-slit electron diffraction. » New Journal of Physics, 13 mars 2013.