

Activité 15.1 : Aspects ondulatoire et particulaire de la matière



1/ Les ondes de matière :

En 1924, le physicien français Louis de Broglie propose d'étendre aux particules matérielles (électrons, protons . . .) la dualité onde-particule admise pour la lumière.

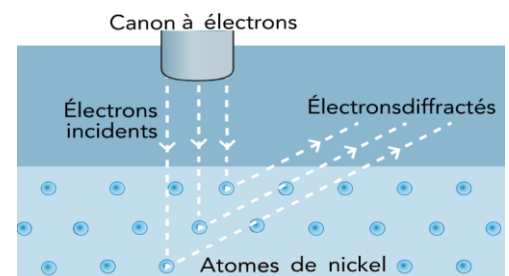
Dans sa thèse, de Broglie écrit : « le fait que, depuis l'introduction par Einstein des photons dans l'onde lumineuse, l'on savait que la lumière contient des particules qui sont des concentrations d'énergie incorporée dans l'onde, suggère que toute particule, comme l'électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée [...] Mon idée essentielle était d'étendre à toutes les particules la coexistence des ondes et des corpuscules découverte par Einstein en 1905 dans le cas de la lumière et des photons. » « À toute particule matérielle de masse m et de vitesse v doit être « associée » une onde réelle » reliée à la quantité de mouvement par la relation : $\lambda = h/p$ où λ est la longueur d'onde associée à la particule matérielle, h la constante de Planck, p la quantité de mouvement de la particule.



Louis de Broglie (1892 – 1987)

La première expérience qui mit en évidence la nature ondulatoire d'une particule autre que la lumière est celle des physiciens américains Davisson et Germer (1927) :

Un faisceau d'électrons issu est dirigé en direction d'un cristal de nickel. Après réflexion, le faisceau d'électrons est recueilli sur une plaque fluorescente et des tâches de diffraction sont observées.



Q1) En quoi l'expérience de Davisson et Germer confirme-t-elle l'hypothèse de De Broglie ?

Q2) Rappeler l'expression de la quantité de mouvement d'une particule matérielle et déterminer la longueur d'onde associée à un électron se déplaçant à $4,4 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Données : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Q3) Quelle grandeur permet d'affirmer qu'à l'échelle macroscopique, le comportement ondulatoire de la matière n'est pas perceptible ?

2/ Interférence d'électrons :

Le phénomène d'interférence est expliqué par le caractère ondulatoire de la lumière :

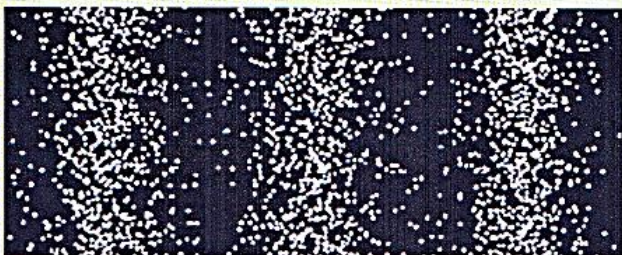
En faisant passer un faisceau lumineux monochromatique et cohérent à travers de fentes très proches (dispositif des fentes d'Young), on observe des franges brillantes correspondant à interférences constructives et des franges sombres correspondant à des interférences destructives.



Doc.2

Que se passe-t-il si l'on réalise l'expérience d'Young avec des particules matérielles comme les électrons ?

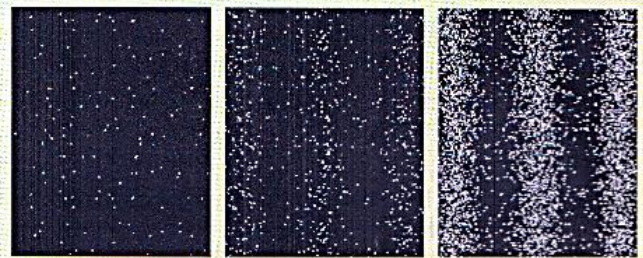
L'expérience des fentes d'Young consiste à envoyer sur une plaque percée de deux fentes parallèles une onde électromagnétique, de longueur d'onde dans le vide λ , issue d'une source lumineuse. En diminuant suffisamment l'intensité lumineuse de la source, on peut considérer que les photons sont émis un par un. On enregistre au cours du temps la position de l'impact de chacun des photons sur un capteur, après la traversée des fentes d'Young. Pour une durée d'expérience très longue, le nombre de photons détectés est grand. Le résultat est représenté sur le **document 3**. Chaque point blanc représente l'impact d'un photon.



Doc. 3 Figure d'interférences obtenue avec des fentes d'Young bombardées photon par photon.

On distingue des zones brillantes (là où beaucoup d'impacts se produisent) qui alternent avec des zones sombres (là où peu d'impacts se produisent même après une longue durée d'expérience). Cette figure est comparable à celle obtenue avec une source lumineuse monochromatique (**doc. 2**).

Si on procède de manière similaire, mais en envoyant des particules de matière, de masse non nulle, telles que des électrons, on observe une distribution identique à celle obtenue avec les photons (**doc. 4**). Les premiers impacts semblent être désordonnés, puis, lorsque leur nombre augmente, ils se répartissent de manière plus organisée. Tous les électrons sont émis dans les mêmes conditions, mais sont détectés en des points différents.



Doc. 4 Figure d'interférences électron par électron. La durée de l'expérience et donc le nombre d'électrons sont croissants de gauche à droite. Les impacts électroniques sur l'écran apparaissent en blanc.

Dans ce type d'expériences, on est incapable de reconstituer la trajectoire de la particule (photon ou électron) puisqu'on ne sait pas par quelle fente elle est passée.

Si on réalise l'expérience en fermant alternativement, l'une ou l'autre des fentes, on n'observe plus de figure d'interférences, mais une distribution d'impacts centrée sur l'une ou l'autre des fentes. Cela a permis de mettre en évidence *l'aspect probabiliste* des phénomènes quantiques.

Q4) Quelles conditions expérimentales permettent d'obtenir les figures des documents 2, 3 et 4 ?

Q5) Dans l'expérience décrite avec les photons, quels aspects des photons sont mis en évidence ? Même question avec les électrons.

Q6) Quelles sont les propriétés différenciant les électrons et les photons ?

Q7) Expliquer la dernière phrase « cela a permis de mettre en évidence l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques » en s'appuyant sur les observations expérimentales.

3/ Le microscope électronique :

Pour mieux comprendre le monde, les scientifiques doivent pouvoir l'observer à différentes échelles. L'invention au XX^{ème} siècle du microscope électronique a permis de repousser les limites de l'observation de l'infiniment petit.

On situe l'apparition du microscope optique au XVII^e siècle. Le Néerlandais Antonie VAN LEEUWENHOEK (1632-1723) en fabrique plusieurs centaines et réalise des observations détaillées d'insectes et même de bactéries. Un de ses microscopes encore en état de nos jours aurait permis de distinguer des détails d'un micromètre de longueur.

Au milieu du XIX^e siècle, les physiciens sont confrontés à la limite du microscope optique : son pouvoir de résolution.

Pouvoir de résolution

C'est la capacité d'un instrument d'optique à obtenir deux images séparées de deux points distincts de l'objet observé. Ce pouvoir de résolution est limité par le phénomène de diffraction de la lumière par l'ouverture circulaire du dispositif optique. Théoriquement, deux points séparés d'une distance inférieure à la longueur d'onde de la lumière qui les éclaire ne peuvent pas être distingués.

En 1931, deux ingénieurs allemands, Max KNOLL (1897-1969) et Ernst RUSKA (1906-1988), construisent le premier microscope électronique. La lumière est remplacée par un faisceau d'électrons et les lentilles par des bobines qui, traversées par un courant électrique, créent un champ magnétique.

Cinq ans auparavant, le physicien français Louis DE BROGLIE a attribué à des particules de matière une longueur d'onde λ telle que $\lambda = \frac{h}{p}$ avec p la valeur

de la quantité de mouvement de la particule et h la constante de Planck. Pour des vitesses de valeurs très inférieures à celle de la lumière dans le vide, la valeur de la quantité de mouvement s'exprime par $p = m \cdot v$.

La longueur d'onde associée aux électrons utilisés dans les microscopes électroniques est inférieure au nanomètre. Le pouvoir de résolution est donc nettement meilleur que celui d'un microscope optique. En accélérant les électrons, on améliore le pouvoir de résolution.

Dans un microscope électronique en transmission (MET), le faisceau d'électrons traverse l'objet étudié. Cela a pour contrainte de n'étudier qu'une fine coupe de cet objet. Le pouvoir de résolution est de 0,2 nm pour les meilleurs modèles.



Microscope électronique à transmission.

Q8) Quel phénomène physique limite la résolution ?

Q9) Pourquoi le pouvoir de résolution d'un microscope électronique est-il meilleur que celui d'un microscope optique ?

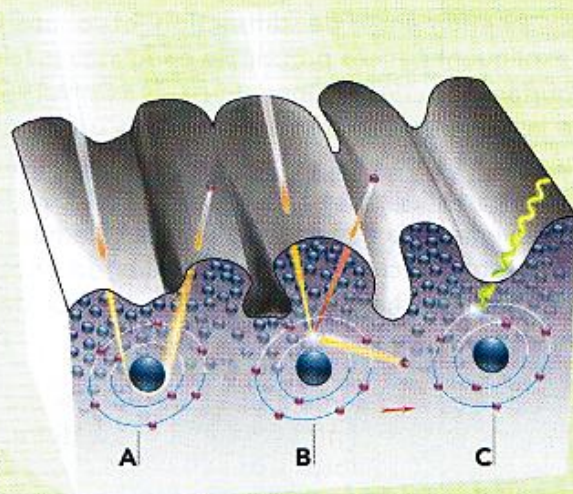
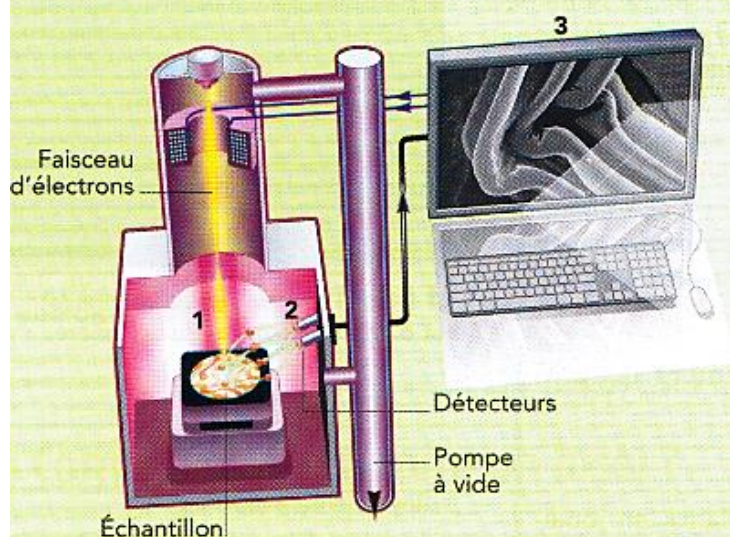
Q10) En vous aidant du document en annexe, comparer les avantages et les inconvénients d'un microscope électronique à balayage à ceux d'un microscope électronique à transmission.

Q11) Sur quels comportements des électrons et des rayons X le schéma illustrant les interactions électron-matière insiste-t-il ? Le terme d'orbite est-il approprié pour le mouvement d'un électron dans un atome ?

ANNEXE

Le microscope électronique à balayage

En exploitant les interactions des électrons avec la matière, le microscope électronique à balayage (MEB) peut restituer une vision directe de la surface d'un objet avec une résolution nanométrique. Il s'agit de balayer cette surface avec un flux focalisé d'électrons et de détecter les particules émises lors de cette interaction.



1. Balayage électronique

L'objet à étudier (mesurant du micron au centimètre) est placé sous vide dans la chambre du microscope. Le canon à électrons et le système d'optique électronique du MEB produisent un faisceau d'électrons primaire qui bombarde point par point la surface de l'objet. L'interaction des électrons avec les atomes rencontrés induit principalement trois types de particules : l'électron rétrodiffusé, l'électron secondaire et le rayon X.

2. Détection des interactions

Les particules émises dans la proche surface de l'objet sont analysées par des détecteurs du MEB. Elles permettent de former différents types d'images : les électrons rétrodiffusés et les rayons X renseignent sur la nature chimique des atomes rencontrés, les électrons secondaires donnent des images en relief permettant de caractériser la morphologie de la surface (topographie).

3. Formation de l'image

Les images résultent du balayage point par point de l'objet et de la détection synchronisée des particules réémises. Plus la zone balayée est petite, plus sa représentation est grossie, jusqu'à un million de fois. En pratique, ce grossissement maximum est limité par la résolution du MEB (environ 1 nm). Un intérêt du MEB est la très grande profondeur de champ, liée à la faible convergence du faisceau d'électrons, qui permet d'obtenir une image nette, même lorsque l'objet présente un relief important.

A. Électron rétrodiffusé

Il s'agit d'un électron du faisceau primaire qui, après avoir interagi avec le champ électrique du noyau d'un atome, change de direction. En fonction de cette nouvelle direction, il peut ressortir de l'objet.

B. Électron secondaire

Il s'agit d'un électron « arraché » à l'orbite d'un atome par un électron primaire. Cet atome devient ionisé et l'électron arraché de faible énergie, peut ressortir s'il provient de la proche surface de l'objet.

C. Rayon X

Il s'agit d'un photon de haute énergie, libéré lors du retour à l'état stable de l'atome ionisé.