

Partie Comprendre : Lois et modèles

CHAP 15-ACT DOC Transferts quantique d'énergie et dualité onde-particule

Objectifs :

- Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules.
- Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule.
- Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste

1. LE MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE

1.1. Documents

Le microscope à force atomique (ou AFM pour *atomic force microscope*) peut servir à visualiser la surface d'un échantillon, par contact avec celui-ci.

Une pointe en silicium (Fig. 1) est montée sur un levier flexible et réfléchissant, qui l'oblige à être en contact avec la surface à étudier (Fig. 2). À courte distance apparaissent des forces répulsives dues aux interactions entre nuages électroniques des atomes de silicium de la pointe et des atomes de la surface étudiée. La pointe balaie cette surface ; son mouvement vertical est suivi grâce à l'enregistrement par la photodiode de la déviation du faisceau laser envoyé sur le levier. Une des applications possibles est l'étude in vitro de l'ADN (Fig. 3).

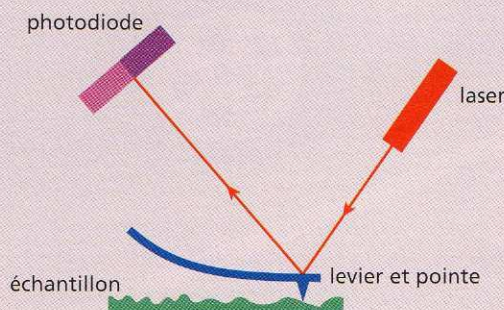


Fig. 2 Schéma de principe d'un microscope à force atomique.

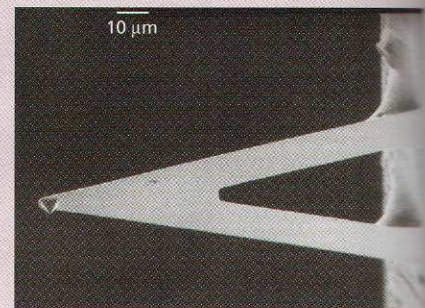


Fig. 1 Pointe d'un microscope à force atomique.

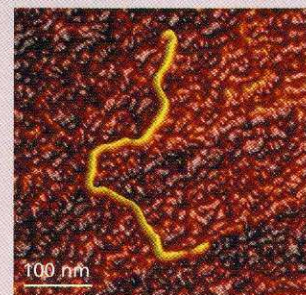


Fig. 3 Image d'un brin d'ADN observé à l'aide d'un microscope à force atomique.

1.2. Questions

- En supposant le poids de la pointe négligeable, déterminer les deux forces qui s'exercent sur elle.
- En utilisant la figure 1, déterminer les ordres de grandeur de la longueur de la pointe et de la largeur de sa base.
- Les atomes de silicium sont distants les uns des autres de $2,4 \cdot 10^2$ pm. Sachant que techniquement la pointe la plus fine réalisable possède une centaine d'atomes côte à côte à son extrémité, déterminer la largeur de l'extrémité de cette pointe.
- Quels autres paramètres que les dimensions de la pointe peuvent entrer en ligne de compte dans la précision de la localisation horizontale du dispositif ?
- Déterminer l'ordre de grandeur de la largeur d'un brin d'ADN à l'aide de la Figure 3. Cette pointe de silicium est-elle adaptée à l'étude de ce brin d'ADN ? Justifier.

2. LE MICROSCOPE ELECTRONIQUE

2.1. Documents

Pour mieux comprendre le monde, les scientifiques doivent pouvoir l'observer à différentes échelles. L'invention au XXe siècle d'un nouveau type de microscope a permis de repousser les limites de l'observation de l'infiniment petit. Sur quels principes repose la microscopie électronique ?

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.

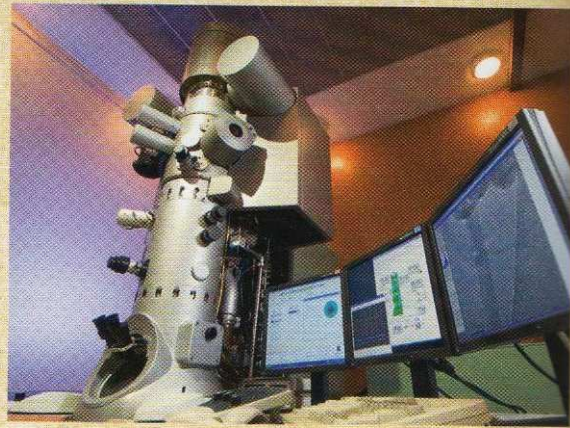
En 1931, deux ingénieurs allemands, Max KNOLL (1897-1969) et Ernst RUSKA (1906-1988), construisent le premier microscope électronique. La lumière est remplacée par un faisceau d'électrons et les lentilles par des bobines qui, traversées par un courant électrique, créent un champ magnétique.

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.



La dualité

Lors d'une de ses conférences, C. COHEN-TANNOUDJI, physicien français, prix Nobel de physique en 1997 à la suite de ses travaux sur « le développement de méthodes pour refroidir et piéger des atomes avec des faisceaux laser », a présenté les éléments de la diapositive ci-contre.

Claude COHEN-TANNOUDJI.

Ordre de grandeur pour un électron

À un électron accéléré par un potentiel de 10 keV*, on associe une onde de matière de longueur d'onde $\lambda = 1,2 \times 10^{-11}$ m.

Pour un atome

La masse M d'un atome est beaucoup plus élevée.

Pour que $\lambda = \frac{h}{M \cdot v}$ reste appréciable,

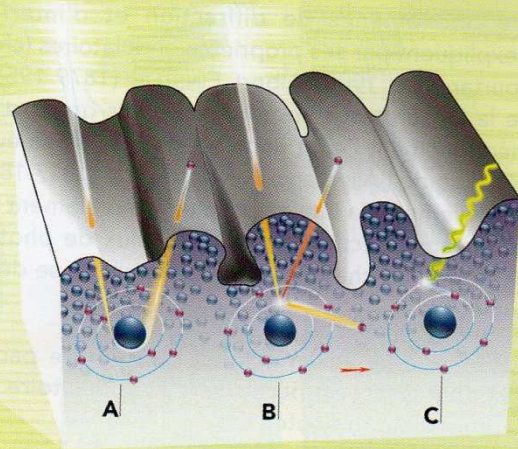
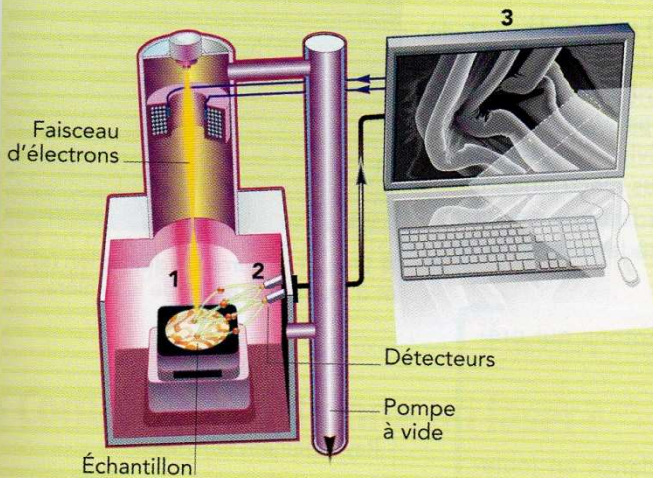
il faut que l'atome ait une vitesse v très faible.

Le comportement ondulatoire des atomes n'est donc visible qu'à très basse température.

* Cet électron possède alors une énergie cinétique égale à 10 keV.

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 grandissement 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.

D'après « Le microscope électronique à balayage », *Défis du CEA*, n° 144, octobre 2009.

2.2. Questions

- Quel phénomène physique limite la résolution ?
- Pourquoi le pouvoir de résolution d'un microscope électronique est-il meilleur que celui d'un microscope optique? Justifier.
- Retrouver par le calcul la longueur d'onde évoquée par C. Cohen-Tannoudji sachant que $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ et que la masse d'un électron est $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.
- Comparer les avantages et les inconvénients d'un microscope électronique à balayage à ceux d'un microscope électronique à transmission.

- e) Sur quels comportements des électrons et des rayons X le schéma illustrant les interactions électron-matière insiste-t-il?
- f) Le terme d'« orbite » est-il approprié pour le mouvement d'un électron dans un atome?
- g) Comment le comportement ondulatoire des atomes peut-il être mis en évidence? Quelles conditions, sur la longueur d'onde de l'onde associée à des atomes et sur la valeur de leur vitesse, cela entraîne-t-il?
- h) Quelle grandeur permet d'affirmer qu'à l'échelle macroscopique le comportement ondulatoire de la matière n'est pas perceptible?

3. LA LUMIERE : ONDE OU PARTICULE ?

Le comportement de la lumière a conduit les scientifiques à la modéliser parfois comme une onde, parfois comme une particule.

4.1. Documents

Théories sur la lumière dans l'histoire des sciences

Dans son *Traité de la lumière*, Christian Huygens (1629-1695) compare la lumière au son. Il interprète la propagation de la lumière comme celle d'une onde et postule l'existence d'un milieu éther pour expliquer cette propagation.

Peu de temps après, Isaac Newton (1642-1727) émet l'hypothèse que la lumière est composée de particules extrêmement rapides. Les couleurs seraient alors expliquées par les masses différentes de ces corpuscules.

Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) prédit, quant à lui, l'existence d'ondes électromagnétiques constituées d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires. La lumière devient alors un cas particulier d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 nm.

Albert Einstein (1879-1955) propose un modèle particulaire de la lumière. Pour le célèbre savant, l'onde électromagnétique de fréquence ν est composée de « grains d'énergie » $E = h \cdot \nu$. Ce retour à l'aspect granulaire de la lumière est, pour lui, le seul moyen d'interpréter l'effet photoélectrique (émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière).



Fig. 1 Figure de diffraction observée lors du passage d'un faisceau laser à travers un trou (sa première observation date de 1665).

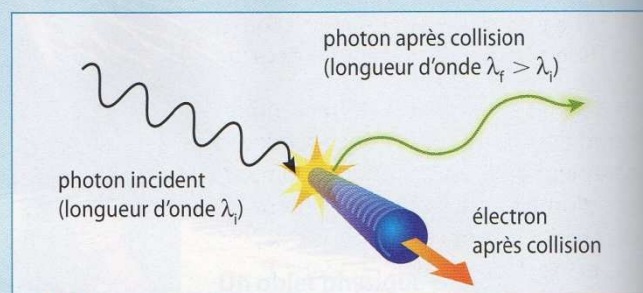
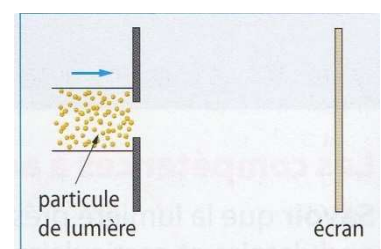


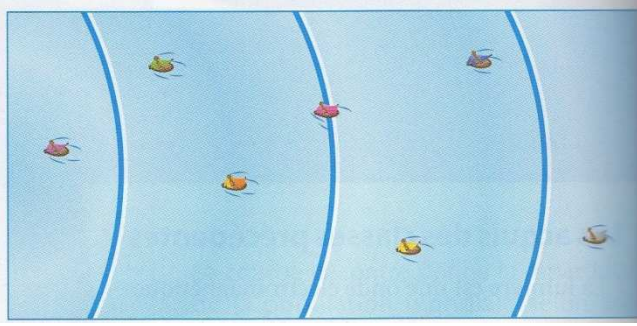
Fig. 2 Effet Compton (découvert en 1917) : un photon voit sa longueur d'onde modifiée après collision avec un électron.

3.2. Questions

- a) Reproduire et compléter le schéma ci-contre, en admettant que la lumière est composée de particules.
- b) L'aspect particulaire de la lumière est-il envisageable dans l'expérience de la figure 1 ?



c) Sur le document ci-après, on observe des vagues, qui forment un système d'ondes mécaniques. Après avoir repéré la longueur d'onde de cette onde mécanique, que pouvez-vous dire de l'influence des bateaux sur celle-ci ?



d) Par analogie avec la situation précédente, déterminer si l'aspect ondulatoire de la lumière peut être envisageable dans l'expérience de la figure 2.

e) Classer les quatre scientifiques du texte en fonction de leur vision sur la lumière.

f) Comment expliquer que les scientifiques aient tant hésité sur la nature de la lumière ?

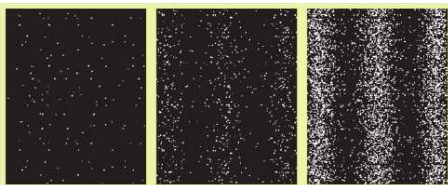
g) De quoi dépend le comportement ondulatoire ou particulaire de la lumière ?

4. UNE NOUVELLE REPRESENTATION

Comment la physique a-t-elle pu unifier deux concepts aussi opposés que les comportements ondulatoire et particulaire de mêmes objets ?

4.1. Pour commencer (situation déclenchante)

1924, le physicien français Louis de Broglie propose d'étendre aux « particules matérielles » (électrons, protons...) la dualité onde-particule admise pour la lumière. Une des expériences illustrant ce double comportement consiste à envoyer des électrons un par un au travers de deux fentes rapprochées, puis à observer leur comportement en sortie, en y plaçant un écran (Doc. 4).



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 sa thèse, publiée la même année, de Broglie écrit : Quand deux théories, fondées sur des idées qui paraissent entièrement différentes, rendent compte avec la même élégance d'une même vérité expérimentale, on peut toujours se demander si l'opposition des deux points de vue est bien réelle et n'est pas due seulement à l'insuffisance de nos efforts de synthèse. »

Dans la relation qui porte son nom, de Broglie rapproche les deux concepts d'onde et de particule dans la même formule : la quantité de mouvement p (concept particulaire) est égale au rapport de la constante de Planck h sur la longueur d'onde λ (concept ondulatoire), soit $p = \frac{h}{\lambda}$

Le comportement ondulatoire des objets peut-il s'observer à notre échelle ?

4.2. Documents

Dans Le Nouveau monde de M. Tompkins, roman de George Gamow et Russell Stannard, le héros est propulsé dans un monde fantastique où la constante de Planck est proche de 1. Un safari est organisé : un groupe d'animaux est rabattu sur une haie continue présentant deux trous. Cette haie passée, les animaux forment alors des zones de plus fortes présences, à l'image des interférences ondulatoires.

5.3. Questions

- a) Dans le monde de M. Tompkins, quelle serait la longueur d'onde associée à des papillons de masse $m = 1,0 \cdot 10^{-3}$ kg et de vitesse $v = 2,0$ m.s⁻¹ ?
- b) Si un nuage de papillons passe à travers un obstacle d'ouverture $a = 1,0 \cdot 10^2$ m, que peut-on prévoir sur la répartition des papillons après l'obstacle ?
- c) Refaire le calcul, en prenant comme valeur de la constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s. Ce résultat semble-t-il plus compatible avec la réalité ?
- d) Quelle constante physique semble contrôler le comportement ondulatoire des objets ?
- e) Reproduire et compléter le tableau suivant avec : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Ensemble d'objets	Masse de l'objet (kg)	Vitesse (m · s ⁻¹)	Taille de l'ouverture a	a/λ
Nuage de papillons	$1,0 \times 10^{-3}$	2,0	1,0 m	
Foule de manifestants	70	1,0	5,0 m	
Nuage d'atomes « refroidis »	$3,34 \times 10^{-26}$	2,0	5,0 nm	
Nuage d'électrons	$9,0 \times 10^{-31}$	500	1,0 μm	

- f) En 1992, une équipe japonaise a observé des franges d'interférence avec des atomes « refroidis », c'est-à-dire ralentis par un laser. Expliquer la nécessité de ralentir les atomes pour observer leur comportement ondulatoire.
- g) Comment la relation formulée par de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$ permet-elle d'unifier les deux concepts classiques d'onde et de particule ?
- h) Pourquoi le comportement ondulatoire des objets macroscopiques est-il inexistant ?
- i) Quelle condition doit vérifier le rapport $\frac{a}{\lambda}$ pour considérer comme dominants les phénomènes ondulatoires ?