

# Chapitre 23 – Introduction à la physique quantique

## Plan du cours

- I Dualité onde-corpuscule pour la lumière**
  - I.1** Modélisation de la lumière
  - I.2** Effet photoélectrique
  - I.3** Description du photon
- II Interactions lumière-matière**
  - II.1** Absorption et émission de photons
  - II.2** Applications
- III Description ondulatoire de la matière**
  - III.1** Dualité onde-corpuscule de de Broglie
  - III.2** Confirmations expérimentales
  - III.3** Applications

## Ce qu'il faut savoir et savoir faire

- Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
- Effet photoélectrique : établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.
- Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.).
- Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière.
- Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.
- Interpréter une expérience illustrant la dualité onde-particule.

## Questions de cours

- Citer les relations de Planck-Einstein et de de Broglie liant l'énergie, l'impulsion et la fréquence ou la longueur d'onde d'une particule.
- Justifier l'expression de l'énergie cinétique d'un électron dans le cas de l'effet photoélectrique.
- Décrire une expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon (effet photoélectrique, effet Compton)
- Décrire une expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière (diffraction et interférence avec des particules matérielles).

# 1 Dualité onde-corpuscule pour la lumière

## 1.1 Modélisation de la lumière

Dans les milieux linéaires, homogènes et isotropes (LHI), la lumière se propage en ligne droite. Cette observation conduit à la première modélisation sérieuse de la lumière comme un flux de particules microscopiques. Cette idée fut notamment défendue par Newton, dont la réputation permit d'assoir cette théorie au XVII<sup>ème</sup> siècle.

À l'opposé, Huygens dès le XVII<sup>ème</sup> siècle, puis Young, Fresnel et Arago au XIX<sup>ème</sup> siècle défendirent un modèle ondulatoire, où la lumière est décrite comme une onde. Cette théorie permettait d'expliquer leurs expériences de diffraction et d'interférence. À la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, Maxwell, puis Hertz et Lorentz parvinrent par ailleurs à synthétiser les travaux de plusieurs de leurs prédécesseurs pour aboutir à la formulation moderne de l'électromagnétisme et l'interprétation de la lumière comme une onde électromagnétique.

Le siècle se terminait donc éclairé par l'espoir d'une synthèse prochaine et complète de toute la physique.

Cependant, il restait quelques ombres au tableau. Lord Kelvin, en 1900, annonçait que deux nuages noirs apparaissaient menaçants à l'horizon de la Physique. L'un de ces nuages représentait les difficultés soulevées par la fameuse expérience de Michelson et Morley qui paraissait incompatible avec les idées alors reçues. Le second nuage représentait l'échec des méthodes de la Mécanique statistique dans le domaine du rayonnement noir ; [...]

Dans les premières années du XX<sup>ème</sup> siècle, les deux nuages de lord Kelvin se sont, si je puis dire, condensés l'un en la théorie de Relativité, l'autre en la théorie des Quanta.

*Recherches sur la théorie des Quanta*, Louis de Broglie (1924).

### Catastrophe ultraviolette

Cette expression attribuée à Ehrenfest, désigne le désaccord entre les résultats expérimentaux et les prédictions classiques concernant le rayonnement thermique du corps noir.

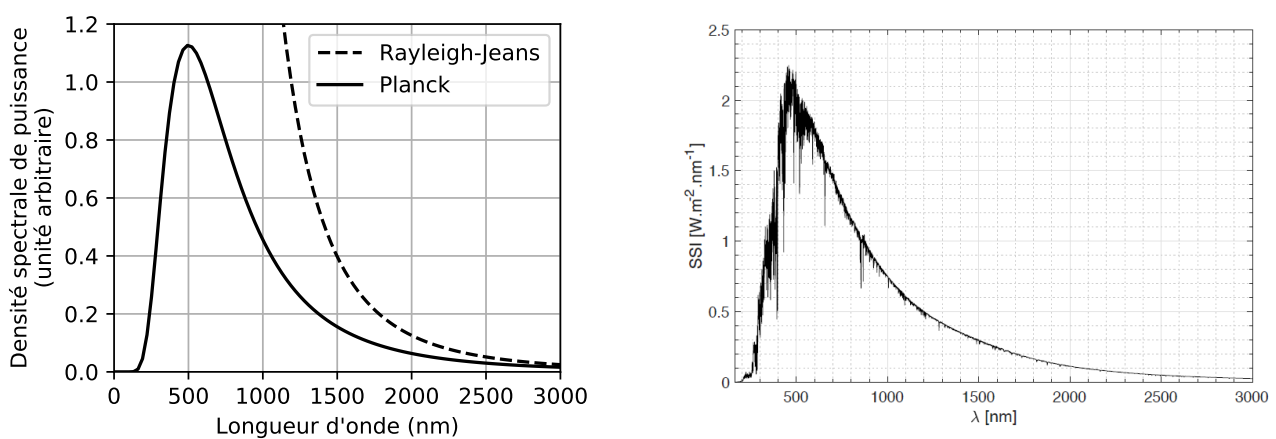


FIGURE 1 – À gauche : spectres du rayonnement thermique du corps noir à 5800 K calculés à partir des lois de Rayleigh-Jeans (cas classique) et de Planck (cas quantique). À droite : spectre du rayonnement solaire, mesuré par l'instrument Solar de la station spatiale internationale.

En considérant l'énergie électromagnétique continue, il est possible de relier le spectre de la puissance émise un corps noir objet à sa température (Fig. 1). Le calcul conduit à la loi de

Rayleigh-Jeans. Toutefois, ce modèle amène un résultat surprenant : la puissance rayonnée pour les faibles longueurs d'onde diverge et l'énergie émise par le corps noir tend vers l'infini. Cette conclusion est en désaccord avec les observations expérimentales et n'est pas physiquement raisonnable.

En 1900, Planck parvint à un bon accord entre la théorie et l'expérience en introduisant dans son calcul une quantification de l'énergie électromagnétique : l'énergie ne peut prendre que des valeurs discrètes et ne s'échange entre la matière et le rayonnement que par multiples d'une valeur minimale  $h\nu$ , où  $\nu$  est la fréquence du rayonnement et  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  est la constante de Planck. Initialement, il ne s'agit que d'un artifice de calcul : Planck appelle d'ailleurs la constante  $h$  *Hilfskonstante*, pour constante auxiliaire. La notion de photon donnera un sens à la quantité  $h\nu$  plus tard.

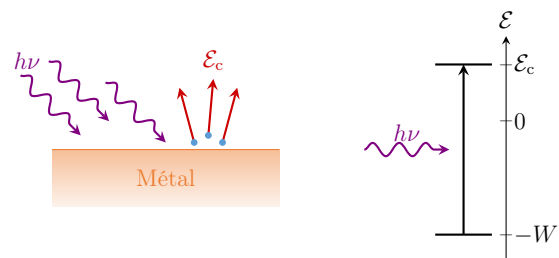
## 1.2 Effet photoélectrique

Un autre phénomène, observé dès la fin du XVIII<sup>ème</sup> par Hertz, échappe à la description ondulatoire de la lumière. Lorsqu'on éclaire un métal avec des ondes électromagnétiques, on observe dans certains cas que des électrons sont émis par le métal : c'est l'**effet photoélectrique**. Ce phénomène dépend de la fréquence  $\nu$  du rayonnement incident. Il existe une fréquence seuil  $\nu_S$  telle que :

- si  $\nu < \nu_S$ , aucun électron n'est arraché, quelle que soit l'intensité du rayonnement incident ;
- si  $\nu > \nu_S$ , des électrons sont émis, et leur nombre est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident.

En 1905, Einstein proposera une explication qui lui vaudra en 1921 le prix Nobel de physique.

Il postule que la lumière se propage par « grains » élémentaires, plus tard appelés photons. Les photons ont alors chacun une énergie  $h\nu$  : si cette énergie est supérieure à l'énergie  $W$  nécessaire pour arracher un électron du métal, l'électron est émis avec une énergie cinétique  $\mathcal{E}_c$  telle que  $h\nu = W + \mathcal{E}_c$ . L'énergie  $W$  est appelée travail d'extraction et ne dépend que du métal utilisé.



### Effet photoélectrique

Un rayonnement de fréquence  $\nu > \nu_S$  est susceptible d'arracher des électrons à un métal : c'est l'**effet photoélectrique**. Les électrons sont émis avec une énergie cinétique  $\mathcal{E}_c$  qui vérifie

$$h\nu = W + \mathcal{E}_c,$$

où  $h$  est la **constante de Planck**. La **fréquence seuil**  $\nu_S$  et le **travail d'extraction**  $W$  ne dépendent que de la nature chimique du métal.

Entre 1905 et 1915, les expériences menées par Millikan confirmèrent la théorie d'Einstein.

**Application 1 – Effet photoélectrique**

On éclaire une plaque de lithium avec un rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu = 1,00 \times 10^{15}$  Hz.

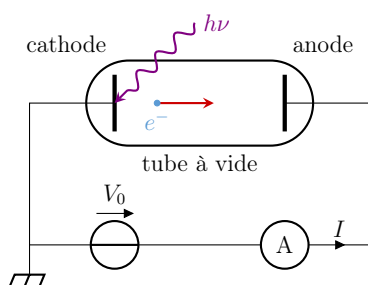
Métal	Lithium	Argent	Zinc	Cuivre
Travail d'extraction (eV)	2,90	4,26	4,33	4,65

1. Déterminer si la lumière utilisée pour éclairer la plaque est dans le domaine du visible.
2. Calculer l'énergie d'un photon associé au rayonnement incident.
3. Justifier que des électrons peuvent être émis et calculer leur énergie cinétique.
4. Déterminer si l'effet photoélectrique se produit aussi avec une plaque de cuivre.

Données :  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$  ;  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

**Expérience de Millikan**

Dans un tube à vide, une plaque de métal (la cathode) est éclairée par un rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu$ . Dans certaines conditions, la cathode émet des électrons qui sont collectés par l'anode. Les deux électrodes sont reliées électriquement par un circuit extérieur : il s'établit un courant électrique dont l'intensité est mesurée par un ampèremètre. L'ajout d'un générateur de tension permet de choisir la différence de potentiel  $V_0$  entre les deux électrodes : si  $V_0 > 0$ , les électrons sont accélérés entre les deux électrodes, ils sont ralentis sinon (Fig. 2).



[phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric](http://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric)

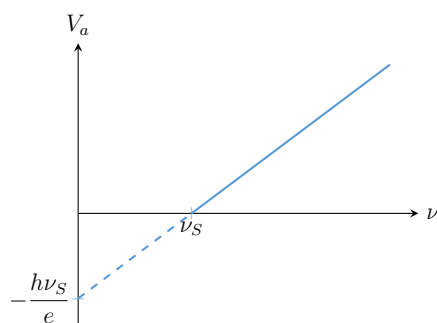


FIGURE 2 – Schéma de l'expérience de Millikan et évolution du potentiel d'arrêt  $V_a$  en fonction de la fréquence  $\nu$  du rayonnement incident.

En faisant varier la fréquence  $\nu$  du rayonnement incident, on relève le potentiel  $V_a$  tel que si  $V_0 \leq -V_a$ ,  $I = 0$ . Le potentiel  $V_a$  est appelé potentiel d'arrêt : il correspond au cas où les électrons arrivent sur l'anode avec une vitesse nulle. Par conservation de l'énergie mécanique d'un électron entre l'anode et la cathode, on a

$$V_a = \frac{h\nu}{e} - \frac{W}{e} = \frac{h}{e}(\nu - \nu_s). \quad (1)$$

Avec ses mesures, Millikan obtint une valeur de  $h$  en bon accord avec celle issue du rayonnement thermique.

**Cellule photoélectrique**

La cellule photoélectrique est un capteur sensible à l'intensité lumineuse, dont le fonctionnement exploite l'effet photoélectrique. Son schéma est similaire à celui de l'expérience de Millikan

(Fig. 2). Pour une valeur positive de  $V_0$ , on observe que l'intensité du courant  $I$  ne dépend que de l'éclairement (ou l'intensité lumineuse) reçu. Le nombre  $N_e$  d'électrons libérés par la cathode et captés par l'anode est toutefois beaucoup plus faible que le nombre  $N_p$  de photons reçus par la cathode. On définit le rendement quantique  $\eta$  de la cellule comme le rapport  $\eta = N_e/N_p$ , qui est de l'ordre de  $10^{-3}$ . Puisque le nombre de photons incidents est proportionnel à l'éclairement, l'intensité du courant l'est aussi.

### Cellule photoélectrique

L'intensité du courant traversant une cellule photoélectrique est proportionnelle à l'éclairement (ou l'intensité lumineuse) qu'elle reçoit.

#### Application 2 – Cellule photoélectrique

La cathode d'une cellule photoélectrique de rendement quantique  $\eta = 1 \times 10^{-3}$ , de surface utile  $s = 100 \text{ mm}^2$ , est éclairée par un rayonnement de fréquence  $\lambda = 500 \text{ nm}$  et d'éclairement  $E_e = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . On observe un courant électrique lorsque l'anode est reliée électriquement à la cathode. On donne  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  et  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

1. Exprimer le nombre  $N_p$  de photons reçus par la cathode pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ . Faire l'application numérique pour  $\Delta t = 1 \text{ s}$ .
2. En déduire l'intensité électrique  $I$  mesurée.

## 1.3 Description du photon

Au XX<sup>ème</sup> siècle, plusieurs expériences vinrent confirmer l'existence du photon, avec notamment la mise en évidence de la quantité de mouvement du photon par l'observation de l'**effet Compton** (1923, Nobel en 1927) : la diffusion d'un photon par un électron s'accompagne d'un recul de l'électron et un changement de la longueur d'onde du photon (cf. TD). En 1980, les expériences d'Alain Aspect ont montré de façon irréfutable l'existence du photon, en exploitant des sources de photons uniques. Plus récemment, en 2012, le prix Nobel de physique récompensait les travaux de Serge Haroche sur la manipulation non destructive de photons.

### Dualité onde-corpuscule pour le photon

On appelle **photon** la particule associée à la lumière. On lui associe des **propriétés ondulatoires** :

- une fréquence  $\nu$  ;
- une longueur d'onde  $\lambda$ , avec  $\lambda = c/\nu$  dans le vide ;

et des **propriétés corpusculaires** :

- une **masse nulle** et une vitesse égale à la vitesse de la lumière  $c$  dans le vide ;
- une quantité de mouvement  $\vec{p} = p\vec{u}$ , avec  $\vec{u}$  vecteur directeur de la propagation.

Son **énergie**  $E$  (J) est reliée à sa fréquence  $\nu$  (Hz) par la constante de Planck  $h$  (J · s)

$$E = h\nu,$$

et sa **quantité de mouvement**  $\vec{p}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), aussi appelée **impulsion**, s'exprime

$$\vec{p} = \frac{E}{c} \vec{u} = \frac{h\nu}{c} \vec{u} = \frac{h}{\lambda} \vec{u} = \hbar \vec{k}, \quad \text{où} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \text{et} \quad \vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}.$$

## 2 Interactions lumière-matière

### 2.1 Absorption et émission de photons

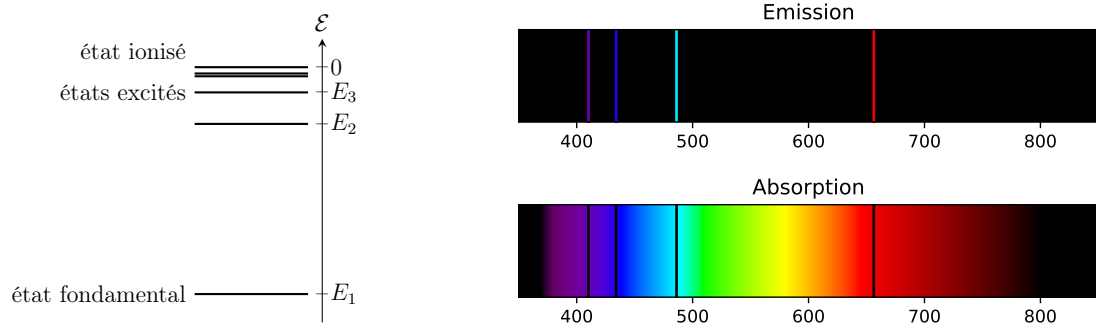
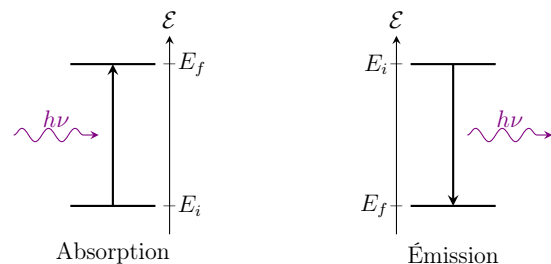


FIGURE 3 – Diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène et allures des spectres d'émission et d'absorption de cet atome.

Les spectres d'émission et d'absorption des atomes sont des spectres de raie. Ceci s'explique par le fait que pour un atome, les niveaux d'énergie accessibles sont quantifiés : il ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, caractéristiques de l'atome. Par exemple, les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène (Fig. 3) sont donnés par

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, \quad \text{où } E_1 = -13,6 \text{ eV.} \quad (2)$$

Pour un atome, une transition électronique correspond au passage d'un état à l'autre et s'accompagne de l'**émission** ou de l'**absorption** d'un photon. Ces phénomènes se retrouvent également pour d'autres particules matérielles : les molécules, noyaux, etc. interagissent de façon similaire avec la lumière.



#### Absorption et émission

Le phénomène d'**émission** s'accompagne d'une transition de la particule entre un état d'énergie  $E_i$  et un état d'énergie  $E_f < E_i$ . Le phénomène d'**absorption** correspond à la transition inverse, avec  $E_i < E_f$ . Par conservation de l'énergie, la fréquence du photon émis ou absorbé vérifie

$$h\nu = |\Delta E| = |E_f - E_i|.$$

#### Application 3 – Série de Balmer

La raie à 410 nm de l'hydrogène appartient à la série de Balmer, qui regroupe les transitions vers l'état  $n = 2$  (Éq. 2). On donne  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  et  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Identifier le deuxième état associé à cette transition.

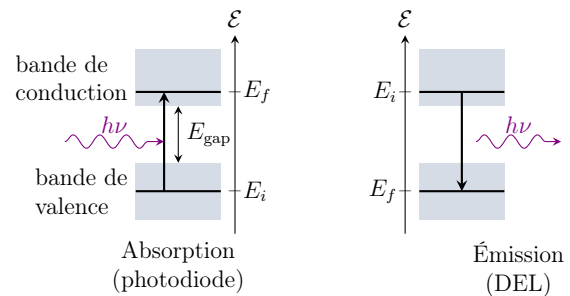
## 2.2 Applications

De nombreuses applications exploitent les interactions entre la matière et le rayonnement.

### Photodiodes et diodes électroluminescentes

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui présentent une structure de bande : les électrons du matériau ne peuvent prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, les bandes permises, séparées par des **bandes interdites**. La dernière bande complètement remplie correspond à la **bande de valence** : les électrons dans cette bande ne participent pas à la conduction électrique.

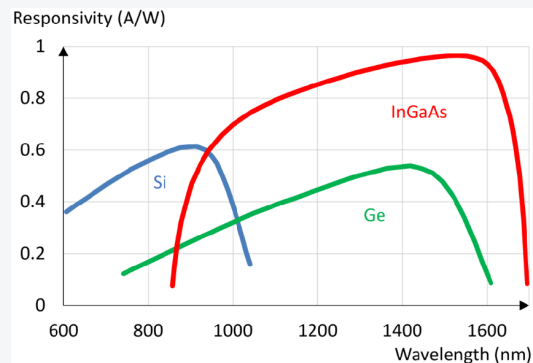
En éclairant un échantillon semi-conducteur, des électrons peuvent absorber un photon d'énergie suffisante pour passer la bande interdite, le *gap*, et atteindre la **bande de conduction** en laissant dans la bande de valence un trou. Le matériau devient alors conducteur ce qui permet de réaliser des capteurs photosensibles.



#### Application 4 – Gap d'un semi-conducteur

Le silicium est un matériau semi-conducteur dont le gap vaut 1,12 eV. Il est couramment utilisé dans la fabrication de composants photosensibles, comme les photodiodes. Les sensibilités typiques de quelques photodiodes sont représentées ci-contre.

1. Interpréter la perte de sensibilité d'une photodiode au silicium pour les grandes longueurs d'onde.
2. Évaluer la largeur  $E_{\text{gap}}$  de la bande interdite de l'InGaAs.



Données : 1 eV =  $1,6 \times 10^{-19}$  J et  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J · s.

En choisissant convenablement les matériaux utilisés, il est aussi possible de séparer les électrons et les trous formés après absorption de photons : une différence de potentiel apparaît, c'est l'**effet photovoltaïque**.

Toujours dans un semi-conducteur, la recombinaison des paires électrons-trous s'accompagne de l'émission de photons. C'est sur ce principe que fonctionnent les **diodes électroluminescentes** (en anglais LED, pour *light-emitting diode*).

### Spectroscopie

Le phénomène d'absorption est exploité dans toutes les techniques de **spectroscopie d'absorption**. Le principe consiste à envoyer un flux connu de photons de fréquence  $\nu$  à travers un échantillon et à mesurer le flux transmis par l'échantillon. Quand la fréquence  $\nu$  correspond à l'écart d'énergie entre deux niveaux des particules de l'échantillon, les photons sont absorbés

et le flux transmis diminue. Puisque ces niveaux d'énergie sont caractéristiques de la nature physique et chimique des particules de l'échantillon, la spectroscopie est une technique de caractérisation performante, largement utilisée en chimie, en astronomie, etc. La **spectroscopie UV-visible** met en jeu des états électroniques, la **spectroscopie IR** des états de vibration ou de rotation des molécules (Fig. 4).

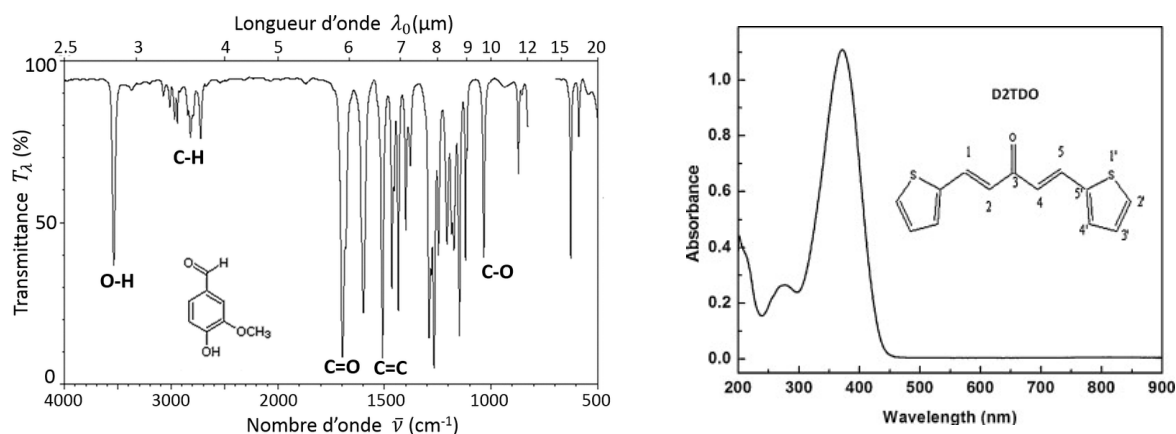


FIGURE 4 – Exemples de spectres IR (à gauche) et UV-visible (à droite).

La mesure de la seconde, définie à partir d'une transition entre des états électroniques du césium repose aussi sur des techniques de spectroscopie.

## 3 Description ondulatoire de la matière

### 3.1 Dualité onde-corpuscule de de Broglie

La notion de dualité onde-corpuscule est donc apparue dans le cadre de la description de la lumière. En 1923, Louis de Broglie (prononcé « de Breuil »), suggéra que cette dualité pouvait également se généraliser aux particules de matière, avec la possibilité d'observer des comportements ondulatoires pour les particules matérielles, telles que les électrons par exemple.

#### Relation de de Broglie

À toute particule, on associe une longueur d'onde  $\lambda_{dB}$ , appelée **longueur d'onde de de Broglie** :

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p},$$

où  $p$  est la quantité de mouvement de la particule. La longueur d'onde de de Broglie caractérise les propriétés ondulatoires de la particule.

L'expression de la quantité de mouvement est celle de la mécanique classique  $p = mv$ , tant que la vitesse des particules reste petite devant la vitesse de la lumière. Dans le cas contraire, il est nécessaire de corriger cette expression pour tenir compte des effets relativistes.

Comme pour la diffraction de lumière, le caractère ondulatoire d'une particule ne devient notable que lorsqu'elle interagit avec des objets dont la taille est comparable à sa longueur d'onde de de Broglie.



### Application 5 – Longueur d'onde de de Broglie

1. Estimer la longueur d'onde de de Broglie d'un neutron thermique à 300 K. À quel domaine électromagnétique un photon de même longueur d'onde dans le vide est-il associé? Justifier que ces particules soient utilisées dans des expériences de diffraction, notamment pour étudier la structure d'un cristal.
2. Pourquoi n'est-on pas diffracté en passant l'embrasure d'une porte?

Données : masse du neutron  $m_n = 1,67 \times 10^{-27}$  kg, constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J·s, constante de Boltzmann  $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$  J · K<sup>-1</sup>.

## 3.2 Confirmations expérimentales

C'est en 1927 que les premières expériences de diffraction d'un faisceau d'électron par Davisson et Germer permettent de valider expérimentalement les idées de de Broglie. De la même façon que les expériences de diffraction des rayons X (photo ci-contre) avaient prouvé en 1912 la nature ondulatoire de ces rayons, la diffraction des électrons permet de mettre en évidence le comportement ondulatoire de la matière et de vérifier quantitativement la relation de de Broglie.

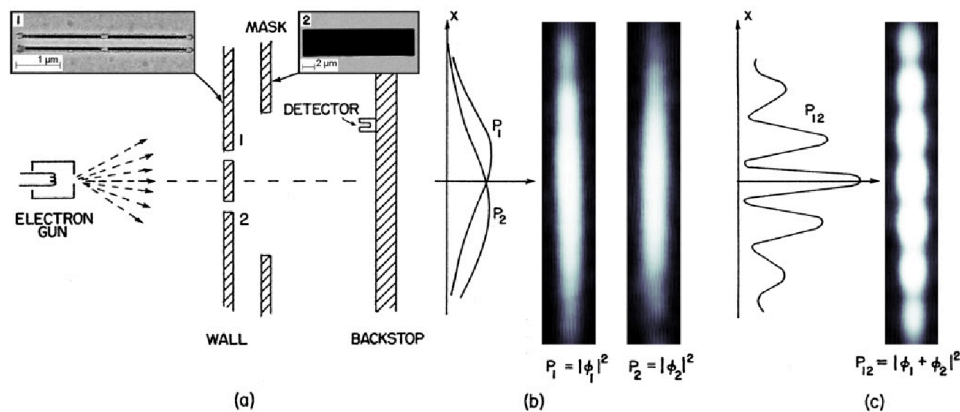
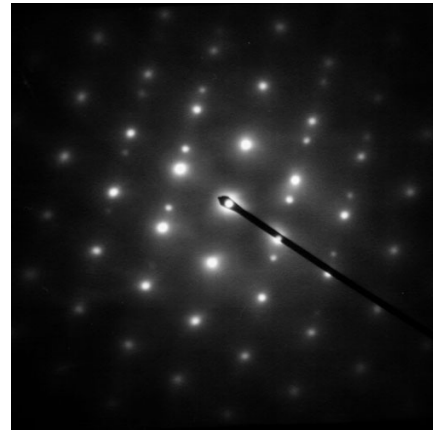


FIGURE 5 – Expérience de type fentes d'Young réalisée avec des électrons (Bach et al., 2013). Un masque permet de bloquer, une fente ou l'autre, ou aucune. Lorsque l'une des fentes est masquée (b), la figure observée sur l'écran s'apparente à une simple figure de diffraction. Lorsqu'aucune des deux fentes n'est masquée (c), on voit apparaître une figure d'interférence. La source d'électrons émet les particules une par une, à un taux proche d'un électron toutes les secondes, si bien que les figures sont construites particule par particule.

[Controlled double-slit electron diffraction, Bach et al. \(2013\)](#)

Des expériences de type fentes d'Young sont réalisées plus tard. Dans les versions les plus récentes, on peut assister à la construction spectaculaire de la figure d'interférence, particule par particule (Fig. 5). Ces expériences initialement réalisées avec des électrons, ont ensuite été reproduites avec des particules de plus en plus massives : neutrons, atomes, molécules. La

difficulté de telles expériences augmente avec la masse des particules utilisées car la longueur d'onde de de Broglie diminue avec la masse des particules. Pour des particules de masse  $m$  soumises à l'agitation thermique à la température  $T$ , la longueur d'onde de de Broglie vérifie

$$\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{\sqrt{3mk_B T}}.$$

Ceci n'a pas empêché des chercheurs, en 1999, d'observer des interférences avec des molécules de fullerène  $\text{C}_{60}$ , puis plus récemment encore avec des molécules dont la masse dépasse  $5000 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

`chap23-double_slit.py`, [ScienceEtonnante](#)

La dualité onde-corpuscule des photons n'échappe plus à ces expériences : grâce à des sources de photons uniques et à des capteurs ultra-sensibles, on peut maintenant observer des figures d'interférence photon par photon.

[Aspden et al., 2016](#)

### 3.3 Applications

Les techniques de microscopie optique sont soumises à la diffraction qui impose une limite de résolution de l'ordre de la longueur d'onde utilisée ( $\sim 500 \text{ nm}$ ). Il est toutefois possible d'utiliser des particules pour sonder la matière à des échelles bien plus petites, jusqu'à imager les atomes eux-mêmes. Si elles sont également soumises à la diffraction, leur longueur d'onde de de Broglie est bien plus faible, ce permet d'améliorer sensiblement la résolution.

Comme vu dans l'application 5, les neutrons thermiques ont une longueur d'onde de de Broglie comparable à la taille d'un atome, ce qui en fait des candidats idéals pour sonder la matière à l'échelle atomique.

#### Application 6 – Microscopie électronique

On souhaite évaluer la longueur d'onde de de Broglie des électrons utilisés dans un microscope électronique. Ils sont accélérés jusqu'à atteindre une énergie cinétique  $E_c = 100 \text{ keV}$ .

1. Évaluer leur vitesse dans la limite classique. Commenter.

On admet, pour un électron de masse  $m_e$  et de vitesse  $v$ , les expressions relativistes de l'énergie cinétique et de l'impulsion  $p$  :

$$E_c = (\gamma - 1)m_e c^2 \quad \text{et} \quad p = \gamma m_e v, \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

2. Calculer la valeur numérique du facteur de Lorentz  $\gamma$ , puis celle de la vitesse  $v$  des électrons.
3. En déduire la longueur d'onde de de Broglie de ces électrons.

Données :  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  ;  $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$  ;  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Les microscopes électroniques utilisent des électrons accélérés. Pour certains, il est possible d'atteindre des longueurs d'onde de de Broglie de l'ordre du picomètre ! De tels microscopes ont par exemple permis d'imager les atomes individuels d'une nanoparticule de platine.

[Chen et al., 2013, en vidéo](#)

La physique quantique est aujourd'hui une théorie extrêmement robuste, dont les prédictions n'ont pas encore été mises en défaut. Une seule chose semble lui échapper : la description de la gravitation.