

La dualité onde-corpuscule de la matière

La dualité onde-corpuscule constitue un principe fondamental en physique, affirmant que tous les objets physiques peuvent manifester à la fois des propriétés d'ondes et de particules.

Découverte : nature de la lumière

L'exemple emblématique de cette dualité est la lumière. Initialement, certains physiciens, comme Newton, croyait que la lumière était composée de particules. Mais plusieurs expériences au début du XIX^{ème} siècle, (par exemple celle des "fentes" Thomas Young^[1]) montrent le contraire : quand la lumière est envoyée sur un réseau de diffraction, on observe un motif d'interférence caractéristique, très semblable aux motifs résultant de l'interférence d'ondulations sur l'eau ; la longueur d'onde de la lumière peut être calculée à partir de tels motifs. Le débat semble alors clos, **la lumière est une onde**.

Mais cela est remis en cause au début XX^{ème} siècle, par des physiciens cherchant à expliquer des résultats expérimentaux inexplicables par la physique classique de l'époque. C'est en fait le "*problème du rayonnement des corps noirs*" qui va les amener à proposer de nouvelles idées.

On savait que la longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus d'énergie lumineuse est inversement proportionnelle à sa température absolue : $\lambda_{\max} \propto \frac{1}{T}$ (Loi de Wien, 1896^[1]). Or, cette loi ne parvenait pas à expliquer de manière adéquate le comportement observé pour les petites longueurs d'ondes : on observait une divergence de la densité d'énergie du rayonnement électromagnétique à des fréquences élevées. Ce problème était connu sous le nom de "*catastrophe ultraviolette*".

Max Planck propose alors en 1900 le concept novateur de **quantification de l'énergie**^[1], qui permet de corriger la loi de Wien là où elle n'est plus en accord avec l'expérience. Il postule que l'énergie émise par un corps noir n'est pas continue, mais plutôt échangée par *quanta* discrets, des paquets d'énergie proportionnels à la fréquence de l'onde électromagnétique.

$$|\Delta E| = n \cdot h \cdot \nu$$

où $n \in \mathbb{N}^*$ est un nombre entier positif, ν la fréquence et h une nouvelle constante universelle, aujourd'hui appelée constante de Planck, avec $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Cette *théorie des quanta* est le premier pas vers la nouvelle physique *quantique* et va être approfondie de la travail beaucoup de grands physiciens au début du XX^{ème} siècle, tel que Schrödinger, Heisenberg ou Born^[2].

C'est notamment Albert Einstein, qui le premier, va se servir de ce nouveau concept pour expliquer l'**effet photoélectrique**^[1]. Dans ses expériences, il observe l'émission d'électrons depuis une plaque métallique sous l'action de la lumière, si est seulement si le rayonnement électromagnétique est d'une fréquence suffisamment élevée. La présence de ce seuil de fréquence n'est alors pas anticipée par la mécanique classique.

Son interprétation est la suivante : **le rayonnement électromagnétique est composé de particules**, et chaque particule (aujourd'hui nommée "*photon*") est un "paquet d'énergie" lié à sa fréquence :

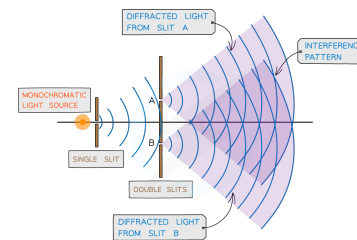
$$E = h \cdot \nu$$

De plus, chaque électron a besoin d'une **quantité minimale d'énergie** pour être éjecté, laquelle est apportée par un photon, d'où l'existence de ce seuil inexplicable auparavant. La lumière se comporte aussi comme une particule ! Cette découverte lui valut le prix Nobel de physique en 1921^[1].

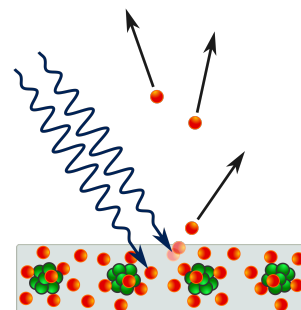
Diffraction

L'expérience de Davisson-Germer (1925)^[1] a mis en lumière la disposition régulière des atomes dans un cristal, conduisant à l'observation de figures de diffraction après un bombardement d'électrons, ce qui révèle donc un comportement d'onde de ces derniers. Aujourd'hui, cette technique est énormément utilisée dans la détermination structurale des molécules (XRD pour X-ray diffraction).

On observe également des choses intéressantes en envoyant des neutrons sur une très longue pièce de graphite^[2]. D'après la théorie ondulatoire, il y a diffusion des protons car les atomes sont diffractés par les différents plans du cristal. Et c'est le cas sur les côtés de cette pièce de graphite. Mais à son extrémité, les choses sont différentes...



Young's double-slit experiment arrangement ^[1]

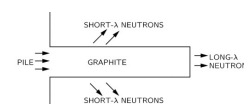


L'énergie des photons qui arrivent par paquets (ondulations bleues) permet l'émission de chaque électron (particules rouges) ^[2]

1. Copyright © Save My Exam, All Rights Reserved

2. https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect

Un graphique de l'intensité en fonction de la longueur d'onde λ à la sortie de la pièce révèle une absence d'effet jusqu'à un " λ seuil" (ce qui n'est pas sans rappeler les conclusions d'Einstein sur l'effet photoélectrique). Certains neutrons deviennent "plus lents" (avec de grandes longueurs d'onde) et ne sont pas diffractés ou diffusés par les plans de graphite, on observe donc un comportement de particule plutôt que d'onde.



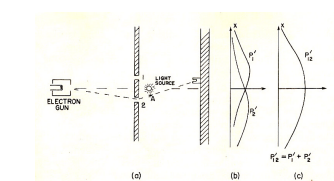
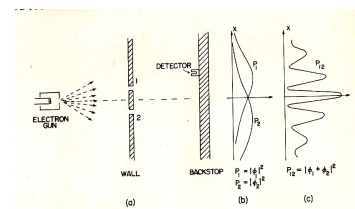
Diffusion de neutrons à travers un bloc de graphite.³

Double fentes de Feynman

Pour continuer à illustrer notre phénomène, une expérience de pensée est proposée par Feynman^[2] : un canon à électrons, deux trous dans une paroi et une plaque d'arrêt. On mesure la probabilité de trouver un électron le long de la plaque d'arrêt, en se demandant si il est passé par l'un ou l'autre trou.

Quand on bouche tour à tour l'un des trous, on trouve une distribution de probabilité assez attendue (P_1 et P_2). Mais on observe bien des interférences sur la probabilité quand les deux trous sont ouverts, comme pour lors de la diffraction de la lumière : les électrons ont un comportement ondulatoire !

Cependant, l'intrigue quantique s'épaissit encore lorsque l'on introduit une petite source lumineuse, afin de "voir" par quel trou les électrons passent. On voit alors P'_1 et P'_2 ne sont pas très différents de P_1 et P_2 , mais la distribution de probabilité totale P'_{12} ne nous montre plus de d'interférence. En présence de cette lumière, l'interférence disparaît, laissant place à un comportement corpusculaire. On déduit donc que si on l'observe, le comportement de l'électron est modifié (il aura été perturbé par notre lumière).



Expériences et probabilités associées.³

On découvre alors le **principe d'incertitude de Heisenberg**^[2], une conséquence de la dualité onde-corpuscule, qui, appliqué à notre expérience de pensée donne : "Il est impossible de construire un appareil permettant de déterminer par quel trou l'électron est passé sans détruire la figure d'interférence". De manière plus générale, le principe d'incertitude s'exprime par l'inégalité :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

avec Δx l'incertitude de la position, Δp l'incertitude de l'impulsion, et \hbar la constante de Planck réduite (obtenue en divisant h par π). Il donc existe une limite fondamentale à la précision simultanée avec laquelle il est possible de mesurer la position et la quantité de mouvement d'une même particule.

Cette expérience aborde le point fondamental du comportement mystérieux des objets quantiques (photon, électron, atome, molécule...) sous son aspect le plus étrange. C'est un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible à expliquer de façon classique et qui contient le coeur de la mécanique quantique. En réalité, il en contient l'unique mystère. — Richard Feynman^[2]

Généralisation à toute la matière

Les résultats de toutes les expériences menées imposent l'acceptation que la matière possède **à la fois une nature ondulatoire et corpusculaire**. Il semble donc qu'à l'échelle de l'infiniment petit, les objets ne suivent pas les comportements intuitifs observés dans le monde macroscopique. Le concept d'ondes-particules est ainsi utilisé pour décrire ces comportements apparemment contradictoires. En fait, toutes les particules manifestent un caractère ondulatoire, comme le propose Louis de Broglie en 1924^[1], **relation de Broglie** :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

où λ est la longueur d'onde, h la constante de Planck, p la quantité de mouvement, m la masse au repos, v sa vitesse, et c la célérité de la lumière dans le vide.

Références bibliographiques

- [1] ATKINS, Peter and JONES, Loretta. Principes de Chimie. 3e éd. : De Boeck Supérieur, 2014
- [2] FEYMAN, Richard, LEIGHTON Robert and SANDS, Matthew. Le cours de physique de Feynman - Mécanique quantique. 4e. éd. : DUNOD, 2021

3. Illustrations dans : FEYMAN, Richard, LEIGHTON Robert and SANDS, Matthew. Le cours de physique de Feynman - Mécanique quantique. 4e. éd. : DUNOD, 2021

Tableau de synthèse pour la fiche de lecture sur la notion de cours : “la dualité onde-particule de la matière”

Références bibliographiques	ATKINS, Peter and JONES, Loretta. Principes de Chimie. 3e éd. : De Boeck Supérieur, 2014	FEYMAN, Richard, LEIGHTON Robert and SANDS, Matthew. Le cours de physique de Feynman - Mécanique quantique. 4e. éd. : DUNOD, 2021
Généralités, histoire.	<i>p. 10 - 11</i> : problème rayonnement corps noirs (catastrophe ultraviolette) : loi de Wien fausse expérimentalement pour les grandes longueurs d'ondes. Proposition de Planck : échange d'énergie par quanta (paquets d'énergie)	<i>p.1</i> : Histoire mécanique quantique (début XXème) et grands noms : Schrödinger, Heisenberg, Born. Comportement de la matière : débat sur lumière / électrons : comportement d'onde ? de particule ?
Effet photo-électrique	<i>p. 11 à 15</i> : Expérience : émission d'électrons depuis une plaque métallique. Chaque électron requiert une quantité minimale d'énergie , laquelle est apportée par un photon. Interprétation d'Einstein : rayonnement électromagnétique est composé de particule, et chaque photon est un “paquet d'énergie”, relié à sa fréquence : relation de Planck-Einstein $E = h \cdot \nu$	
Interférences d'onde	<i>p. 15 - 16</i> : Rayonnement électromagnétique est ondulatoire : argument de la diffraction, interférences destructives ou constructives observées (fentes de Young).	<i>p. 7 à 12</i> : Expérience de pensée : canon à électrons, deux trous dans une paroi et une plaque d'arrêt. Calcul : probabilité de trouver un électron le long de la plaque. Observation d'interférence → <i>comportement ondulatoire</i> ET si on place une petite lumière : plus d'interférence → <i>comportement corpusculaire !</i>
Diffraction par un cristal	<i>p. 17</i> : Expérience de Davisson-Germer (1925) : disposition régulière des atomes dans un cristal → observation de figure de diffraction (<i>comportement d'onde ...</i>). Aujourd'hui : technique importante de détermination structurale des molécules (XRD pour X-ray diffraction).	<i>p. 23 à 25</i> : Piles à neutrons. Envoie de neutrons sur une très longue pièce de graphite : diffusion et réfraction. Graphe de l'intensité en fonction de la longueur d'onde (λ) au bout de la pièce : rien pour une jusqu'à un “ λ seuil”. ⇒ neutrons qui sont “plus lents” (grands λ) et qui ne sont pas diffusés sur les côtés (<i>comportement de particule ...</i>)
Généralisation et principe d'incertitude	<i>p. 16</i> : Toute les particules ont un caractère ondulatoire : relation de Broglie $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ La matière a à la fois un caractère ondulatoire et un caractère corpusculaire.	<i>p. 12</i> : Principe d'incertitude de Heisenberg (appliqué à son expérience de pensée) : “Il est impossible de construire un appareil pour déterminer par quel trou l'électron est passé, sans pour autant détruire la figure d'interférence”. Plus généralement, on a $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$