

Chapitre 5

Dualité onde-corpuscule

5.1 Aspect corpusculaire de la lumière

5.1.1 Expérience de Hertz (1887)

Une plaque de zinc montée sur un électroscope est chargée, puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de Hg (figure 5.1).

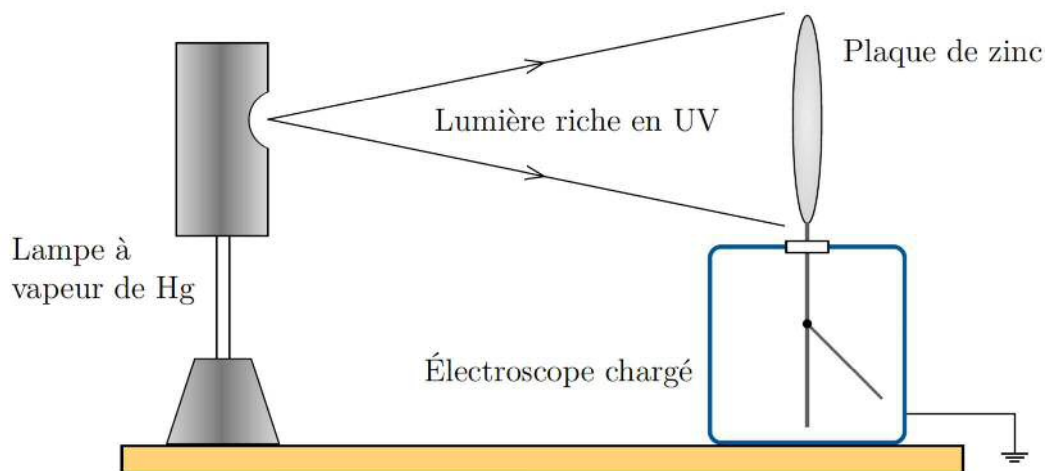


FIGURE 5.1 – Dispositif de l'expérience de Hertz

Observations :

L'expérience comporte trois étapes :

1. Initialement la plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement : l'aiguille de l'électroscope dévie.
Puis la plaque de zinc est éclairée : l'électroscope se décharge.
2. La plaque de zinc est rechargée négativement et une plaque de verre est interposée entre la lampe et le zinc : il n'y a plus de décharge bien que le zinc soit toujours éclairé à travers le verre. Même en rapprochant davantage la lampe de la plaque, la décharge n'a pas lieu.
La plaque de verre est enlevée : la décharge s'effectue immédiatement.

- La plaque de zinc est chargée positivement, puis éclairée : la décharge ne se produit pas.

Interprétation :

La lumière, éclairant la plaque de zinc, permet d'extraire des électrons du métal.

- À l'étape 1, les électrons, une fois extraits, sont repoussés par la charge négative de la plaque : la décharge s'effectue.
- À l'étape 2, la lumière ayant traversé le verre n'a plus l'énergie « adéquate » pour sortir des électrons du zinc, malgré le fait qu'en approchant la lampe on ait augmenté l'énergie captée.
La lumière émise par la lampe à Hg est riche en rayonnement ultraviolet. Or le verre arrête le rayonnement ultraviolet (fréquence $\nu > 7,5 \cdot 10^{14}$ Hz). Il laisse par contre passer le rayonnement visible et infrarouge lequel ne permet donc pas d'obtenir l'effet photoélectrique même s'il est très intense!
- À l'étape 3, la plaque de zinc, chargée positivement, rappelle les électrons émis : la décharge n'est pas observée.

Définition On appelle *effet photoélectrique* l'extraction d'électrons de la matière par un rayonnement électromagnétique.

5.1.2 Comment peut-on extraire un électron d'un métal ?

Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs entre lesquels circulent des électrons liés au réseau mais libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau.

Pour extraire un électron, il faut lui fournir une énergie W_s , appelée *travail de sortie* ou *travail d'extraction*. Elle représente l'énergie de liaison de l'électron au réseau métallique.

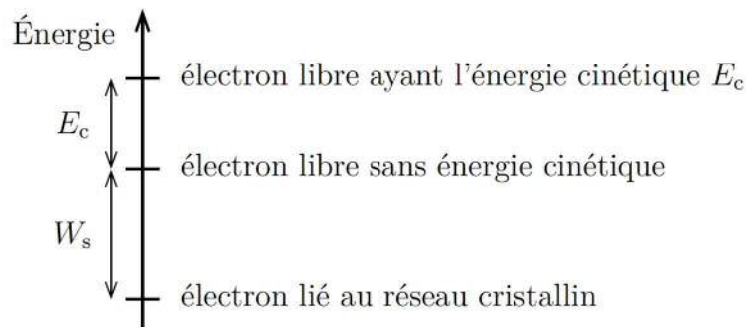


FIGURE 5.2 – Diagramme énergétique pour un électron

Le diagramme énergétique de la figure 5.2 illustre que :

- à l'intérieur du métal, l'électron a le moins d'énergie, car il est lié au réseau ;
- lorsque l'électron a capté l'énergie $E = W_s$, il est sorti du métal et est au repos ($E_c = 0$) ;

- lorsque l'électron a capté une énergie $E > W_s$, il est sorti du métal et a une énergie cinétique $E_c = E - W_s$.

5.1.3 Insuffisance du modèle ondulatoire

Dans le cadre du modèle ondulatoire, un rayonnement lumineux est considéré comme une onde électromagnétique. Comme toute onde, une onde électromagnétique transporte de l'énergie de façon continue. L'énergie transportée par unité de temps à travers une surface est :

- proportionnelle à l'intensité de la lumière (égale au carré de l'amplitude de l'onde) ;
- indépendante de la fréquence de l'onde.

Ce modèle n'arrive pas à expliquer certains résultats de l'expérience de Hertz :

- un rayonnement UV peut extraire des électrons du métal alors qu'un rayonnement du domaine visible de même intensité n'y arrive pas ;
- un rayonnement visible de forte intensité n'apporte pas, même après une durée considérable, l'énergie nécessaire pour extraire des électrons du métal.

5.1.4 Modèle corpusculaire de la lumière

L'expérience de Hertz permet de conclure que l'énergie apportée par un rayonnement lumineux, bien que quantitativement suffisante, ne l'est pas toujours qualitativement.

Pour expliquer l'effet photoélectrique, nous devons renoncer au modèle ondulatoire et recourir au modèle corpusculaire de la lumière. L'hypothèse suivante fut formulée par Einstein en 1905.

Modèle corpusculaire de la lumière *Un rayonnement électromagnétique de fréquence ν peut être considéré comme un faisceau de particules indivisibles : les photons. Chaque photon transporte un quantum d'énergie :*

$$E = h\nu$$

où h représente la constante de Planck.

5.1.5 Les propriétés du photon

Le photon (ou *grain de lumière*) est une particule élémentaire relativiste associée à une onde électromagnétique de fréquence ν . Cette coexistence de propriétés corpusculaires et ondulatoires est appelée *dualité onde-corpuscule*.

Les principales propriétés du photon sont :

- On lui attribue une masse au repos nulle. Sa masse relativiste n'est pas nulle et vaut E/c^2 .

- Il a une charge électrique nulle.
- Il se déplace dans le vide à la vitesse $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.
- Son énergie est $E = h\nu$ avec $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s.
Comme $\nu = \frac{c}{\lambda}$ la relation précédente peut également s'écrire : $E = \frac{hc}{\lambda}$.

5.1.6 Interprétation de l'effet photoélectrique

Considérons un photon d'énergie $E = h\nu$ pénétrant dans un métal. Sur son parcours, il peut éventuellement rencontrer un électron et lui céder quasi instantanément toute son énergie. Le photon est complètement absorbé, il disparaît.

Ainsi, contrairement aux phénomènes ondulatoires, l'énergie n'est pas échangée de façon continue, mais de façon *discontinue* par paquets indivisibles, de contenu $E = h\nu$ chacun. Ces paquets représentent la plus petite quantité d'énergie échangée et sont appelés *quanta* d'énergie.

Énoncé *L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon et un électron, où le photon cède toute son énergie.*

Lorsqu'un électron absorbe un photon, trois cas sont envisageables :

- $h\nu = W_s$

L'énergie du photon est égale au travail de sortie de l'électron et suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal ! La fréquence correspond alors à la *fréquence seuil* du métal :

$$\nu = \nu_s = \frac{W_s}{h}.$$

- $h\nu < W_s \Leftrightarrow \nu < \nu_s$

L'énergie du photon est inférieure au travail de sortie et donc insuffisante pour extraire un électron du métal : l'effet photoélectrique ne se produit pas et l'électron reste prisonnier du réseau métallique.

- $h\nu > W_s \Leftrightarrow \nu > \nu_s$

L'énergie du photon est supérieure au travail de sortie. L'électron capte l'énergie $h\nu$. La partie W_s de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique ; l'électron conserve l'excédent sous forme d'énergie cinétique E_c :

$$E_c = h\nu - W_s = h\nu - h\nu_s = h(\nu - \nu_s)$$

ce qui est la *relation d'Einstein* pour l'effet photoélectrique (prix Nobel 1921).

5.1.7 Propriétés d'un rayonnement électromagnétique

Un rayonnement électromagnétique est caractérisée par sa fréquence ν et sa puissance P . La puissance d'un rayonnement électromagnétique éclairant une surface s'écrit :

$$P = \frac{N}{\Delta t} h \nu$$

où N est le nombre de photons frappant la surface pendant l'intervalle de temps Δt .

Remarque :

L'augmentation de la puissance d'une source de lumière monochromatique de fréquence donnée fait augmenter le nombre de photons émis par seconde.

5.2 Aspect ondulatoire des particules

5.2.1 Quantité de mouvement du photon

On a vu que le photon est une particule associée à une onde électromagnétique. L'énergie E de la particule est liée à la fréquence ν de l'onde par la relation :

$$E = h \nu = \frac{h c}{\lambda} \quad (5.1)$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

L'étude de la relativité restreinte a montré que l'énergie du photon peut aussi être exprimée en fonction de sa quantité de mouvement p :

$$E = p c \quad (5.2)$$

Les relations (5.1) et (5.2) donnent :

$$\frac{h c}{\lambda} = p c$$

et finalement :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (5.3)$$

5.2.2 Longueur d'onde d'une particule matérielle

En considérant les analogies entre onde et particule d'une part et entre onde électromagnétique et photon d'autre part, Louis de Broglie présenta en 1924 (prix Nobel en 1929) la *théorie* suivante :

Énoncé À toute particule de quantité de mouvement p est associée une onde de longueur d'onde λ avec :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Davisson et Germer ont réalisé en 1927 une expérience (la figure 5.3 montre le schéma du dispositif) mettant en évidence le comportement ondulatoire des électrons. Ils ont pu vérifier expérimentalement la formule de De Broglie pour les électrons.

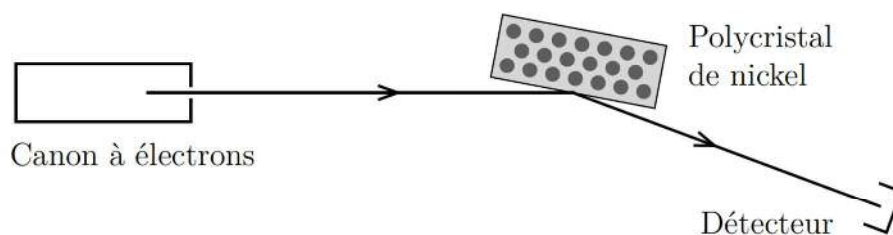
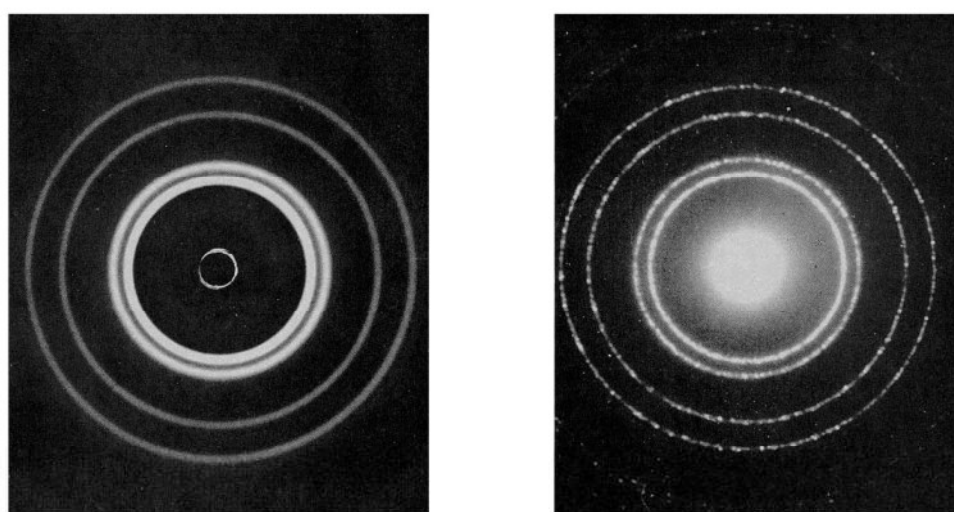


FIGURE 5.3 – Schéma du dispositif utilisé par Davisson et Germer



(a) photons

(b) électrons

FIGURE 5.4 – Diffraction par une feuille d'aluminium

5.2.3 Caractère ondulatoire des particules matérielles

D'autres expériences de diffraction par un cristal (figure 5.4) ou d'interférences par une double fente (figure 5.5) ont confirmé les hypothèses de De Broglie.

Dualité onde-corpuscule *Toutes les particules présentent un caractère ondulatoire.*

Le caractère ondulatoire des particules est d'autant plus prononcé que la longueur d'onde associée à la particule est grande, c'est-à-dire que la quantité de mouvement de la particule est faible (relation 5.3).

Ceci explique pourquoi il est impossible de mettre en évidence le caractère ondulatoire d'un corps macroscopique. Il faudrait utiliser des obstacles de diffraction d'une dimension largement inférieure à la taille des protons.

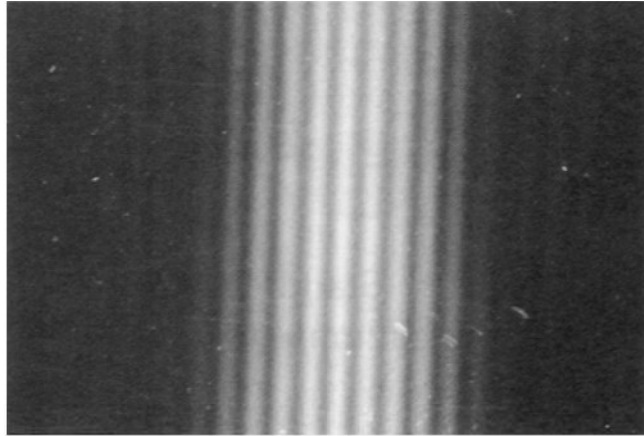


FIGURE 5.5 – Interférences d'électrons par une double fente