

Effet photoélectrique et Diffraction d'électrons

Dualité onde-corpuscule

Introduction

A la fin du XIX^{ème} siècle, la Physique Classique se divisait en 2 domaines :

- la Physique des particules et des solides régie par les lois de la Mécanique Classique développées depuis Newton (XVII^{ème} siècle)
- La Physique ondulatoire reposant essentiellement sur les équations de Maxwell-Lorentz (milieu du XIX^{ème}).

Mais au début du XX^{ème} siècle, les progrès accomplis dans la connaissance des objets microscopiques vont bouleverser l'édifice classique. Parmi les nombreuses expériences réalisées, deux d'entre elles illustrent bien l'insuffisance des concepts classiques et la nécessité des concepts peu à peu introduits dans la Mécanique Quantique : l'effet photoélectrique et la diffraction d'électrons.

Dans le cas de l'effet photoélectrique, Einstein en 1905 démontre que l'interaction rayonnement-matière ne peut s'expliquer dans le cadre de la théorie ondulatoire mais nécessite une interprétation corpusculaire. En effet, lors de l'interaction avec la matière, tout se passe comme si le rayonnement était constitué de grains d'énergie $h\nu$ appelés photons.

A l'inverse, les résultats de l'expérience de Davisson et Germer sur la diffusion d'un faisceau d'électrons par des solides ne peuvent s'interpréter en considérant les électrons comme des particules chargées régies par les lois de la Mécanique Classique. Les diagrammes de diffraction observés imposent d'associer une onde aux électrons. On peut alors, à partir des résultats expérimentaux, déterminer la longueur d'onde associée aux électrons : cette dernière s'avérera en parfait accord avec l'hypothèse de De Broglie.

Ce type d'expériences (et bien d'autres) conduiront à une description mixte des phénomènes, associant aspect corpusculaire et ondulatoire : c'est ce que l'on appelle la dualité onde-corpuscule.

A) Effet photoélectrique

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, on observa l'émission d'électrons lorsque l'on irradie sous vide un métal avec un rayonnement électromagnétique, ultraviolet en général (voir figure 1 ci-dessous). Mais contrairement aux prédictions de la théorie classique, l'énergie cinétique des électrons émis ne dépendait pas de l'intensité du rayonnement incident mais seulement de sa fréquence ν . Par contre, le nombre d'électrons émis par seconde était proportionnel à l'intensité du rayonnement. C'est en 1905 qu'Einstein fournit une interprétation des résultats observés en considérant que le rayonnement est constitué de 'grains' d'énergie $h\nu$.

- 1) On considère un dispositif tel que celui de la figure 1. L'énergie d'extraction (encore appelée travail de sortie) des électrons de l'électrode émettrice ou photocathode est $2eV$. On irradie cette électrode avec un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 0.5 \mu m$.
 - a) Calculer l'énergie des photons incidents.
 - b) Calculer l'énergie cinétique maximale E_{cmax} des photoélectrons émis.
 - c) Calculer leur vitesse et la comparer à la vitesse c de la lumière dans le vide.
 - d) Calculer la longueur d'onde associée à ces photoélectrons.
- 2) Quel potentiel électrostatique V faut-il appliquer à l'électrode collectrice pour annuler le courant de photoélectrons ?
- 3) On définit le rendement quantique ρ de la photocathode comme le pourcentage de photons efficaces, c'est-à-dire ceux qui réalisent l'extraction d'un électron. Sachant que pour un

flux lumineux de 1 Watt, le photocourant est de 16.3 mA, calculer le rendement quantique de la photocathode.

- 4) On irradie maintenant la photocathode avec des rayons X de longueur d'onde 0.1\AA .
- Calculer l'énergie des photons incidents.
 - Calculer l'énergie cinétique maximale E_{cmax} des photoélectrons émis.
 - Calculer leur vitesse et la comparer à la vitesse c de la lumière dans le vide. Commenter.

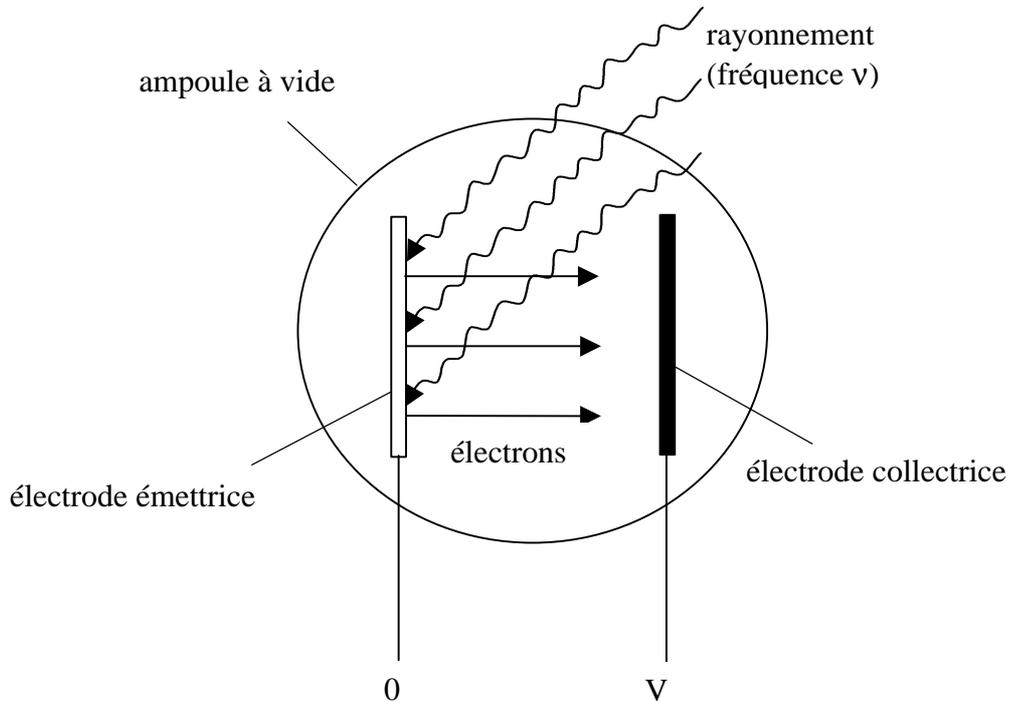


Figure 1 : Effet photoélectrique

B) Diffraction d'électrons

En optique, lorsque l'on illumine une fente de largeur a par un rayonnement de longueur d'onde λ , lorsque λ et a sont du même ordre de grandeur, il y a diffraction du rayonnement incident par la fente. Si l'on utilise un réseau de fentes équidistantes de d ($d > a$), les ondes diffractées par les différentes fentes interfèrent et l'on obtient une figure de diffraction où les maxima d'intensité correspondent à des valeurs particulières du rapport λ/d .

Ces phénomènes ont leur équivalent à l'échelle atomique. En effet, si l'on irradie un atome par un rayonnement, il y aura diffraction du rayonnement incident par l'atome si la longueur d'onde du faisceau incident λ est du même ordre de grandeur que la taille de l'atome, c'est-à-dire dans la gamme $0.1-1\text{\AA}$. Si l'on irradie non plus un atome mais un solide cristallin, c'est-à-dire un solide constitué d'atomes arrangés périodiquement dans l'espace, les ondes diffractées par les atomes vont interférer et l'on obtiendra ainsi une figure de diffraction présentant des maxima pour des valeurs particulières du rapport λ/d où d est la distance entre atomes.

La découverte des rayons X qui ont des longueurs d'onde typiques de $0.1-1\text{\AA}$ par Röntgen en 1897 permit l'essor des expériences de diffraction X par des solides cristallins et la détermination des principales structures cristallines existantes.

En 1927, Davisson et Germer ont montré que le même type de diagramme de diffraction pouvait être obtenu en utilisant non pas des rayons X mais un faisceau d'électrons. Ces résultats ne pouvaient pas être interprétés par la Mécanique Classique qui considère l'électron comme une particule chargée mais seulement en associant une onde à l'électron, conformément à l'hypothèse de De Broglie. Partant de cette hypothèse, l'expérience de Davisson et Germer permet de calculer la longueur d'onde associée aux électrons et la valeur trouvée est en parfait accord avec celle de De Broglie. C'est ce que nous allons montrer dans cette partie du TD.

1) Diffraction de rayons X par un cristal de nickel

On considère un faisceau de rayons X parallèles, de longueur d'onde $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$, incident sur la surface d'un cristal de nickel, en faisant un angle θ avec la surface, taillée parallèlement à une famille de plans atomiques (cf. figure 2).

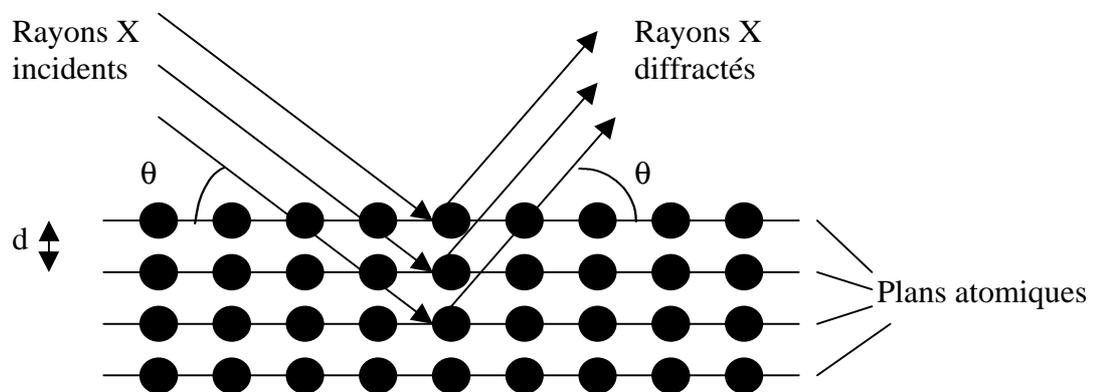


Figure 2 : Diffraction de rayons X par un cristal.

- Calculer la différence de marche δ entre 2 rayons diffractés par 2 plans successifs en fonction de d .
- Quelle est la condition d'observation de maxima d'intensité diffractée en fonction de d , λ et θ ?
- Sachant que l'on obtient un maximum d'intensité d'ordre 1 pour $\theta_1 = 58^\circ$, en déduire la distance entre les plans atomiques du cristal.

2) Diffraction d'électrons

Davisson et Germer ont réalisé la même expérience en utilisant cette fois un faisceau d'électrons d'énergie cinétique $E_c = 48 \text{ eV}$ incident sur un cristal de nickel. Ils ont obtenu un maximum d'électrons diffractés pour un angle $\theta = 72^\circ$.

- En utilisant la relation du 1.b), calculer la longueur d'onde associée aux électrons.
- Comparer la valeur du 2.a) avec celle donnée par la formule de De Broglie.

Éléments de réponse

A.1.a) $E(\text{photons incidents}) = 2.48 \text{ eV}$

A.1.b) $E_{\text{cmax}} = 0.48 \text{ eV}$

A.1.c) $v/c = 1.37 \cdot 10^{-3}$

A.1.d) $\lambda = 17.7 \text{ \AA}$

A.3) $\rho = 4\%$

A.4.a) $E(\text{photons incidents}) = 0.124 \text{ MeV}$

A.4.b) $E_{\text{cmax}} = 0.124 \text{ MeV}$

A.4.c) $v/c = 0.63$.

B.1.a) $\delta = 2d \sin\theta$

B.1.b) $2d \sin\theta = n\lambda$

B.1.c) $d = 0.91 \text{ \AA}$

B.2.a) $\lambda = 1.73 \text{ \AA}$

B.2.b) $\lambda = 1.77 \text{ \AA}$

COMPLEMENT (voir intranet)

Photoémission X