

L'expérience de Davisson et Germer ou les ondes de matière

1 Le postulat de Louis de Broglie

Depuis 1905, la relation de Planck-Einstein relie l'énergie E d'un photon à la fréquence ν de l'onde associée.

$$E = h\nu$$

Combinée à l'expression (relativiste) de la quantité de mouvement d'un photon¹:

$$p = \frac{E}{c},$$

elle donne l'expression de la quantité de mouvement d'un photon:

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

et donc une relation entre la longueur d'onde λ de la lumière et la quantité de mouvement du photon:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1)$$

Dans sa thèse de doctorat soutenue en 1924, Louis de Broglie postula que la relation (1) était en fait valable pour tout type de particules. Il s'agit encore d'un saut conceptuel, puisque par là L. de Broglie postulait que toute particule, même affectée d'une masse, de quantité de mouvement p avait des propriétés ondulatoires, qu'on pouvait lui associer une "onde de matière" de longueur d'onde donnée par la relation (1). Alors que le postulat d'Einstein confère à la lumière, qui est classiquement une onde, un caractère corpusculaire, celui de de Broglie associe aux particules élémentaires, qui sont classiquement corpusculaires, un aspect ondulatoire. La relation (1) est appelée **Relation de Louis de Broglie** et la longueur d'onde λ associée à une particule de quantité de mouvement p est appelée **longueur d'onde de de Broglie**.

2 La confirmation expérimentale

2.1 La diffraction des rayons X

En 1912, Max von Laue avait découvert que les rayons X étaient diffractés par un cristal, de même que la lumière visible est diffractée par un réseau. Cette découverte prouvait à la fois:

¹La relation classique $p = mv$ n'est valable que pour des particules de vitesse très inférieure à c , et de masse non nulle (cf Approche Documentaire sur la Relativité).

- ✓ **la nature ondulatoire des rayons X**: ce sont des ondes comme la lumière visible, ce que l'on ignorait à l'époque

- ✓ **la structure périodique des cristaux**: un cristal se comporte comme un réseau. Les atomes sont alignés régulièrement dans une structure cristalline, chaque atome diffracte les rayons X incidents et l'on observe un pic d'intensité dans les directions où les différentes ondes diffractées interfèrent constructivement (Fig. 1).

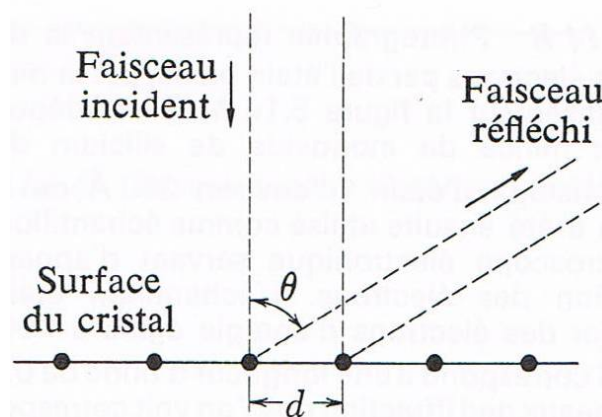


Figure 1: Diffraction des rayons X par un plan cristallin

Sous incidence normale, la condition d'interférences constructives donne la direction des pics d'intensité:

$$d \sin(\theta) = k\lambda \quad (2)$$

où k est un nombre entier relatif. La relation (2) est appelée **relation de Bragg**. La mesure des angles de diffraction permet donc de connaître la distance entre les atomes du réseau, ou bien la longueur d'onde des rayons X. Von Laue démontra ainsi que les rayons X avaient une longueur d'onde de l'ordre de $\lambda \sim 0,1 \text{ nm}$ comme les distances interatomiques dans un cristal. La diffraction des rayons X est encore de nos jours une technique importante d'exploration des structures cristallines.

2.2 L'expérience de Davisson et Germer

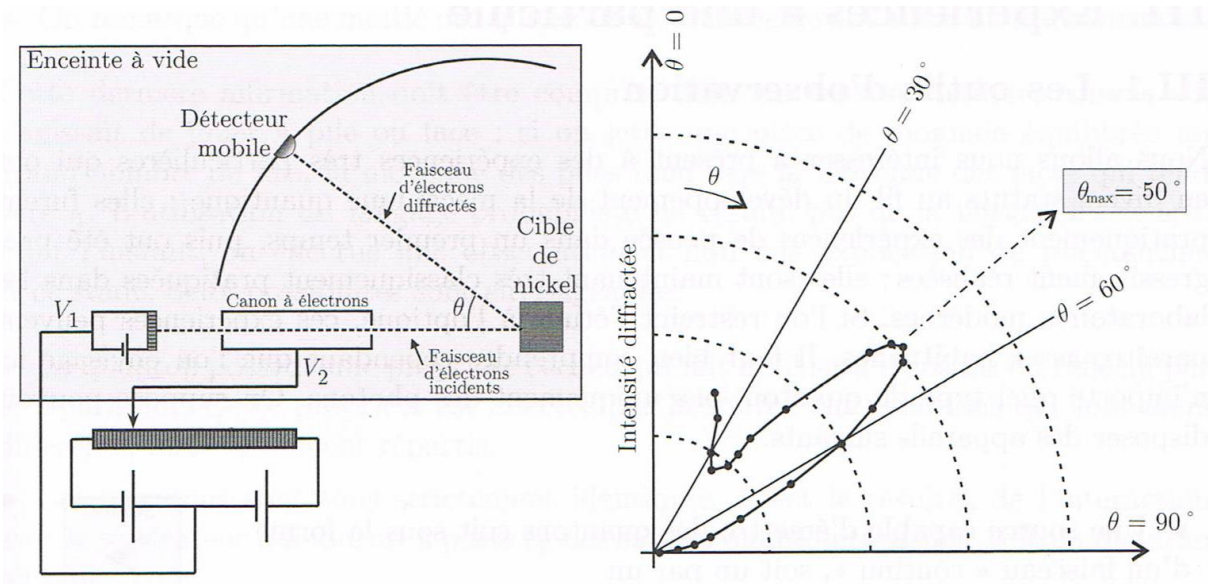


Figure 2: Expérience de Davisson et Germer

L'hypothèse de de Broglie ne mit pas longtemps à trouver une contrepartie expérimentale. En 1927, soit trois ans après la thèse de de Broglie, Clinton Davisson et Lester Germer bombardent une cible de nickel monocristallin par des électrons dont ils maîtrisent la vitesse grâce à un canon à électrons utilisant une tension électrique ajustable. Un détecteur mobile permet ensuite d'étudier la dépendance angulaire du faisceau diffracté. Le dispositif expérimental est présenté Fig. 2, ainsi que l'intensité diffractée, en coordonnées polaires. On observe que les électrons sont diffractés par la cible principalement dans une direction privilégiée, qui est prévue par la relation de Bragg (2), à condition de considérer que la longueur-d'onde des électrons est donnée par la relation de de Broglie (1).

Cette expérience prouve donc que les électrons ont un comportement ondulatoire, comme la lumière ou les rayons X. Elle permet aussi de vérifier quantitativement la validité de la relation de de Broglie.

Depuis, on a réalisé de nombreuses expériences qui vérifient le caractère ondulatoire de toutes sortes de particules: diffraction de neutrons, interférences d'électrons, d'atomes et même de molécules. La relation de de Broglie

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

est donc universelle, et s'applique aussi à des objets composés comme les atomes ou les molécules ! De fait, les objets macroscopiques en mouvement ont une longueur d'onde de de Broglie, donnée par la même relation, mais elle est tellement courte que les aspects ondulatoires sont tout-à-fait imperceptibles. Que ce soit William Bragg en 1915 (à 25 ans), Albert Einstein en 1921 (à 42 ans), Louis de Broglie en 1929 (à 37 ans) ou Clinton Davisson en 1937 (à 56 ans), pour ne citer que ceux-là, tous reçurent le prix Nobel de physique dont le comité ne savait plus où donner de la tête à cette époque.

Questions

1. Démontrer la relation de Bragg.
2. L'énergie cinétique des électrons utilisés dans l'expérience de Davisson et Germer était

$$E_c = 54 \text{ eV}.$$

Quelle était la tension $U = V_1 - V_2$ entre la cathode et l'anode du canon à électrons ?

3. D'après la théorie de la Relativité (1905), la relation $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ n'est valable que pour des vitesses inférieures au dixième de la célérité de la lumière. Utiliser cette relation pour calculer la vitesse des électrons dans l'expérience de Davisson et Germer et vérifier l'hypothèse non-relativiste.
4. Montrer que dans ce cas on peut aussi écrire que la quantité de mouvement est

$$p = \sqrt{2mE}$$

5. Calculer la longueur-d'onde associée aux électrons dans l'expérience de Davisson et Germer et montrer qu'elle a le bon ordre de grandeur pour observer la diffraction des électrons par un cristal.
6. A partir du diagramme de la Fig. 2, calculer la distance interatomique dans le cristal sachant que le pic représenté est le seul pic observé d'ordre non nul.
7. A votre avis, quel est le principe de fonctionnement du détecteur ? Quelle grandeur physique représente en fait l'"intensité diffractée" ?
8. Calculer la longueur-d'onde d'un grain de poussière de masse $m = 10^{-15} \text{ kg}$ et de vitesse $v = 1 \text{ mm.s}^{-1}$. Comparer à son diamètre $D = 1 \text{ } \mu\text{m}$ et expliquer pourquoi on ne pourra pas détecter de comportement ondulatoire pour un grain de poussière.