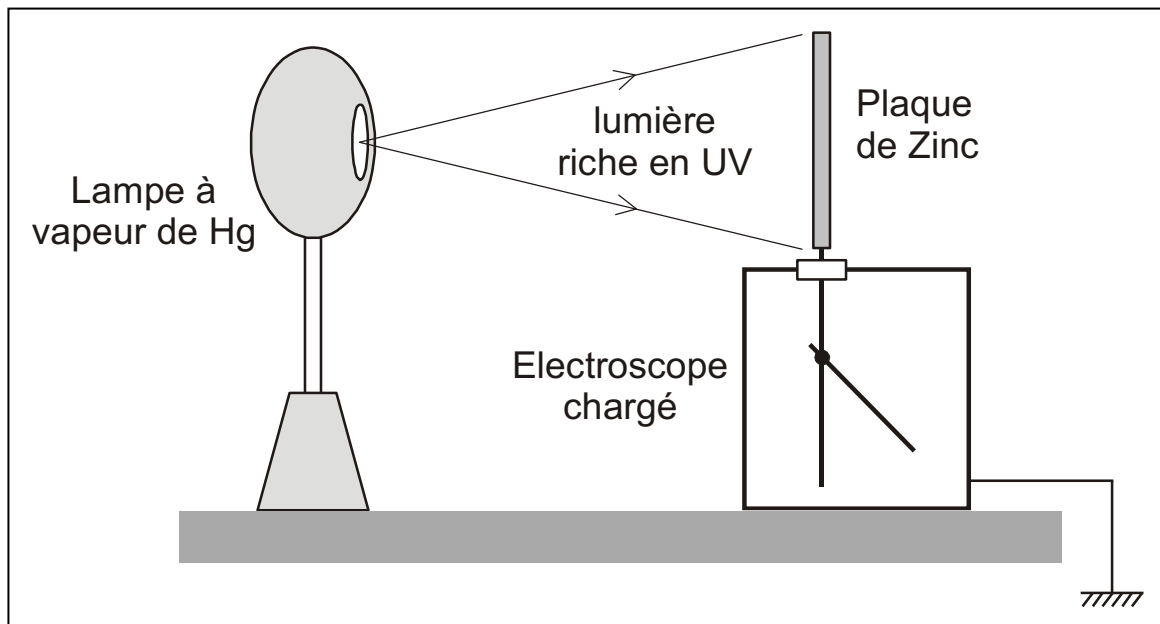


## Chapitre 9: Dualité onde - corpuscule

### 1. Aspect corpusculaire de la lumière : l'effet photoélectrique

#### a) Expérience de Hertz (1887)

**Description:** Une plaque de zinc montée sur un électroscope est chargée, puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de Hg.



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

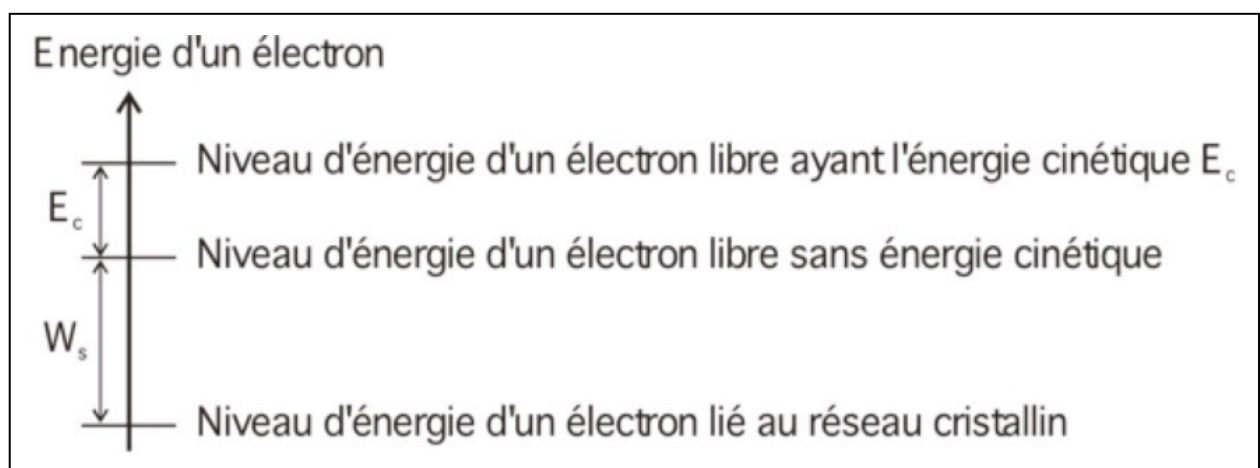
**Interprétation :** La lumière, éclairant la plaque de zinc, permet d'extraire des électrons du métal : c'est l'effet photoélectrique.

- \* A l'étape 1, les électrons, une fois extraits, sont repoussés par la charge négative de la plaque : la décharge s'effectue.
- \* A l'étape 2, la lumière ayant traversé le verre n'avait plus l'énergie "adéquate" pour sortir des électrons du zinc, malgré le fait qu'en approchant la lampe on ait augmenté l'énergie captée.
- \* A l'étape 3, la plaque de zinc, chargée positivement, rappelle les électrons émis : la décharge n'est pas observée.

### b) 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**. ( $W_s$  représente l'énergie de liaison de l'électron au réseau métallique.)



Le diagramme énergétique 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, mais il 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  $E_c = E - W_s$ .

**c) Quel est le rôle de la plaque de verre dans l'étape 2 de l'expérience de Hertz?**

La lumière émise par la lampe à Hg est riche en rayonnement ultraviolet. Or le verre arrête le rayonnement ultraviolet ( $f > 7,5 \cdot 10^{14}$  Hz). Il laisse par contre passer le rayonnement visible et infrarouge lequel ne permet pas d'obtenir l'effet photoélectrique même s'il est très intense!!

**d) Insuffisance du modèle ondulatoire : modèle corpusculaire: hypothèse d'Einstein (1905)**

Une onde électromagnétique, comme toute onde, transporte de l'énergie. On peut s'attendre à ce qu'un faisceau de forte intensité apporte l'énergie nécessaire pour extraire des électrons d'un métal. Or l'étape 2 de l'expérience de Hertz montre qu'il n'en est pas toujours ainsi. L'énergie apportée, bien que quantitativement suffisante, ne l'est pas qualitativement.

Pour expliquer l'effet photoélectrique, nous devons renoncer au **modèle ondulatoire** et recourir au **modèle corpusculaire** de la lumière.

**Modèle corpusculaire de la lumière: hypothèse d'Einstein**

Un rayonnement électromagnétique de fréquence  $f$  peut être considéré comme un faisceau de **particules indivisibles** : les **photons**. Chaque photon transporte un **quantum d'énergie**  $E = hf$  où  $h$  représente la constante de Planck.

**e) Les propriétés du photon**

- \* Le photon (ou *grain de lumière*) est une particule élémentaire relativiste associée à une onde électromagnétique de fréquence  $f$  (dualité onde-corpuscule!).
  - \* 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 :  $E = hf$  avec  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js.
- Comme  $f = \frac{c}{\lambda}$  la relation précédente peut également s'écrire :  $E = \frac{hc}{\lambda}$

### f) Les propriétés de l'onde électromagnétique

\* L'onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence  $f$  et sa puissance  $P$ .

\* La puissance d'une onde électromagnétique éclairant une surface s'écrit : 
$$P = \frac{N}{\Delta t} hf$$

où  $N$  est le nombre de photons d'énergie  $E=hf$  frappant la surface pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ .

### g) Interprétation de l'effet photoélectrique à l'aide du modèle corpusculaire

Considérons un photon d'énergie  $E = hf$  pénétrant dans un métal. Sur son parcours, il peut éventuellement rencontrer un électron et lui céder quasi instantanément ( $\Delta t < 10^{-9}$  s) 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 entiers** (= indivisibles), de contenu  $E = hf$  chacun: **les quanta**.

**L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon et un électron, où le photon cède toute son énergie à l'électron et lors de laquelle cet électron est extrait du réseau métallique.**

### h) Existence d'un seuil photoélectrique

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

1. **L'énergie du photon est égale au travail de sortie de l'électron**  $\Leftrightarrow hf = W_s$   
L'énergie du photon suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal!  
La fréquence  $f$  du photon correspond à la **fréquence de seuil**  $f_s$  du métal :  $f = f_s = W_s/h$ .
2. **L'énergie du photon est inférieure au travail de sortie**  $\Leftrightarrow hf < W_s \Leftrightarrow f < f_s$   
L'énergie du photon incident est insuffisante pour extraire un électron du métal : l'effet photoélectrique ne se produit pas et l'électron reste prisonnier du réseau métallique.
3. **L'énergie du photon est supérieure au travail de sortie**  $\Leftrightarrow hf > W_s \Leftrightarrow f > f_s$   
L'électron capte l'énergie  $hf$ . Une partie,  $W_s$  de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique; l'électron conserve l'excédent sous forme d'énergie cinétique  $E_c$  :

$$E_c = hf - W_s = hf - hf_s = h(f - f_s) \quad \text{Relation d'Einstein (Prix Nobel 1921)}$$

## 2. Aspect ondulatoire des particules : la diffraction des électrons

### a) Considération préliminaire

- \* Le chapitre des ondes a montré qu'une onde stationnaire (ou « piégée ») dans un milieu de propagation limité (la corde) ne peut pas osciller avec n'importe quelle fréquence : Sa fréquence est quantifiée :

$$f_n = n \frac{c}{2L} \quad \text{où } n \in \mathbb{N}^*$$

- \* Le chapitre sur l'atome de Bohr montrera que l'énergie d'une particule (l'électron) liée (ou « piégée ») ne peut pas prendre n'importe quelle valeur : Son énergie est quantifiée :

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{où } n \in \mathbb{N}^*$$

**Conclusion:** l'énergie d'une particule « piégée » a un comportement analogue à la fréquence d'une onde « piégée ». Cette quantification constitue une analogie entre le comportement d'une particule piégée et celui d'une onde stationnaire.

### b) Longueur d'onde et quantité de mouvement du photon

On a vu que le photon (particule lumineuse) est associé à une onde électromagnétique.

L'énergie de la particule E est liée à la fréquence de l'onde f par la relation :

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

où h est la constante de Planck, c = vitesse de la lumière et  $\lambda$  = longueur d'onde du photon.

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 :  $E = pc$ . (2)

(1) et (2) donnent :  $h \frac{c}{\lambda} = pc$

Finalement :  $\lambda = \frac{h}{p}$  (3)

### c) Longueur d'onde et quantité de mouvement 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** présente en **1924** (prix Nobel en 1929) la **théorie** suivante :

**À toute particule de quantité de mouvement p, on peut associer une onde de longueur d'onde  $\lambda = \frac{h}{p}$  où h est la constante de Planck.**

### d) Expérience de DAVISSON-GERMER (ne figure pas au programme)

Davisson et Germer ont réalisé en 1927 une expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire des électrons. Ils ont pu vérifier expérimentalement la formule de De Broglie pour les électrons.

#### \* Description

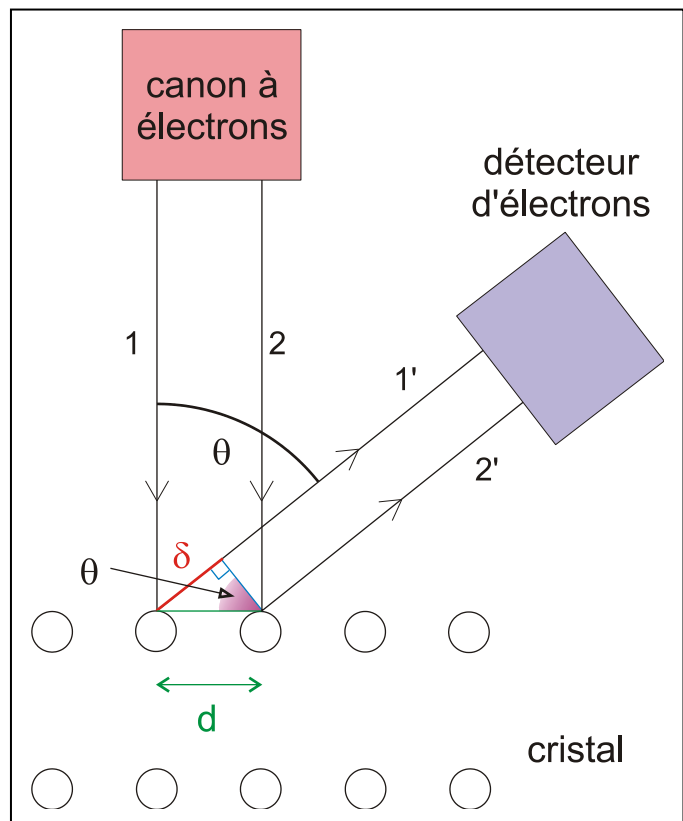
L'appareillage de Davisson-Germer est un tube en verre vidé d'air, qui a dans son intérieur un accélérateur d'électrons, une cible constituée par un cristal de structure connue (cristal de nickel) et un détecteur d'électrons.

#### \* Schéma simplifié de l'expérience

L'accélérateur émet un faisceau d'électrons avec une certaine vitesse  $v$  reliée à la tension accélératrice  $U$  par le théorème de l'énergie cinétique :  $\frac{1}{2} \cdot mv^2 = eU$  ( $e$  et  $m$  sont la charge et la masse de l'électron)

Le cristal est frappé par les électrons (électrons incidents 1, 2) et diffracte ceux-ci dans certaines directions (électrons diffractés 1', 2').

Le détecteur peut tourner autour de la cible pour détecter dans quelles directions (indiquées par l'angle  $\theta$ ) le faisceau électronique est diffracté.



#### \* Observation

L'expérience a montré qu'un maximum d'électrons sont diffractés suivant les directions données par la relation de l'interférence constructive : différence de marche  $\delta$  égale à un nombre pair de demi-longueurs d'onde.

$$\delta = d \cdot \sin\theta = n\lambda \quad \text{où } \lambda \text{ satisfait la relation de De Broglie pour les électrons } \lambda = h/mv.$$

$$\text{En introduisant la tension accélératrice } U : \quad \lambda = h \cdot (2emU)^{-1/2}$$

$$\text{Davisson et Germer ont finalement vérifié la relation : } d \cdot \sin\theta = nh \cdot (2emU)^{-1/2}$$

#### \* Conclusion

Les électrons de vitesse  $v$  se comportent comme une onde de longueur d'onde  $\lambda = h/mv$ .

**e) Caractère ondulatoire des particules matérielles**

Aujourd'hui de nombreuses expériences montrent quotidiennement :

**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 masse (l'énergie) de la particule est faible (relation (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.)