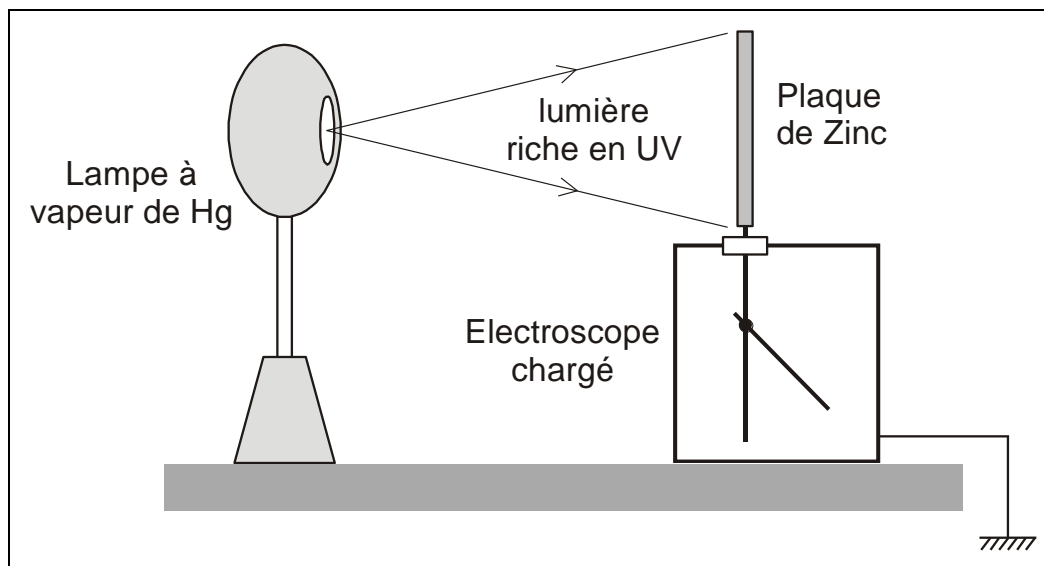


C2: Dualité onde - corpuscule

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 & Interprétation en 3 étapes :

1. La plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement et l'aiguille de l'électroscope dévie. La plaque de zinc est éclairée par la lumière riche en UV: l'électroscope se décharge.

➔ *La lumière permet d'extraire des électrons du métal : effet photoélectrique. Ces électrons sont repoussés par la plaque négative qui perd ainsi sa charge.*

2. La plaque de zinc est rechargée négativement et une plaque de verre (=filtre UV, $\nu > 7,5 \cdot 10^{14}$ Hz) est interposée entre la lampe et le zinc: il n'y a plus de décharge même si on rapproche davantage la lampe de la plaque.

➔ *La lumière sans UV, la qualité de la lumière ne suffit plus pour extraire les électrons même si on augmente l'intensité de la lumière. L'énergie d'interaction de la lumière dépend de la fréquence (couleur) de la lumière.*

3. La plaque de zinc est chargée positivement puis éclairée par UV : pas de décharge.

➔ *Les électrons sont rattrapés par la plaque positive. La lumière n'arrive pas à extraire des ions positifs de la plaque.*

On appelle effet photoélectrique, l'extraction d'électrons de la matière par de la lumière (=rayonnement électromagnétique).

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 éjecter un électron il faut :

- 1) lui fournir une énergie W_s , appelée **travail de sortie** ou **travail d'extraction** pour libérer l'électron de la liaison au réseau métallique. W_s correspond à l'énergie de liaison de l'électron au réseau et dépend de la nature du métal. On l'exprime souvent en électrons-Volts. p.ex. $W_{s \text{ Zinc}} = 3,3\text{eV}$ $W_{s \text{ K}} = 2\text{eV}$ $[1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}]$
- 2) pour s'éloigner du métal, l'électron a besoin d'une certaine énergie cinétique E_{cin}

Si l'électron évolue alors à travers le vide il peut circuler vers une deuxième électrode et on peut détecter un courant photoélectrique.

c) Insuffisance du modèle ondulatoire : introduction des photons

Une onde électromagnétique, comme toute onde, transporte de l'énergie. Ainsi une lumière plus intense devrait transporter plus d'énergie. En effet si la fréquence est suffisante alors le flux d'électrons devient plus grand avec une intensité plus grande. Mais dans la 2^e étape de l'expérience de Hertz on constate que si la lumière filtrée a une fréquence insuffisante, le phénomène n'a pas lieu même si on augmente l'intensité. L'énergie apportée, bien que quantitativement suffisante, ne l'est pas qualitativement. Or ceci est incompatible avec un modèle ondulatoire.

Pour expliquer l'effet photoélectrique, nous devons recourir au **modèle corpusculaire** de la lumière. La lumière n'interagit pas comme une onde mais comme une particule ou paquet de lumière avec les électrons. (Analogie Punching Ball)

Hypothèse d'Einstein (1905):

L'énergie lumineuse est émise ou absorbée sous forme de "grains" d'énergie.

Dans ses interactions avec la matière, une onde électromagnétique de fréquence ν peut être considérée comme un **faisceau de particules indivisibles: les photons**.

Chaque photon transporte un quantum d'énergie :

$$E = h \cdot \nu \text{ avec } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s (const. de Planck) et } \nu = \text{fréquence en Hz}$$

$$\text{ou bien } E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ avec } \lambda = \text{longueur d'onde dans le vide}$$

$$\text{masse au repos: } \quad \text{nulle} \quad \text{masse en mouvement : } m = \frac{h \cdot \nu}{c^2}$$

$$\text{charge électrique: } \quad \text{nulle}$$

$$\text{vitesse: } \quad \text{vitesse de la lumière } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s (dans le vide)}$$

La lumière présente donc une double nature onde-corpuscule (wave-icle).

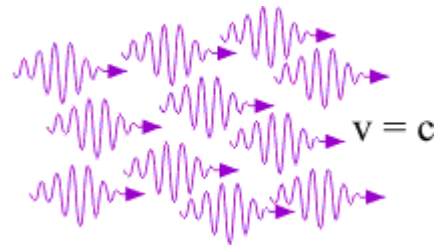
L'onde électromagnétique est caractérisée par sa fréquence ν et sa puissance P .

Elle se **propage** comme une **onde** à la vitesse c et **interagit par photons** = paquets d'énergie $E = h \cdot \nu$.

La puissance d'une onde électromagnétique éclairant une

surface s'écrit : $P = \frac{N}{t} h \nu$

où N est le nombre de photons frappant la surface pendant le temps t .



Ex.: Calculer le nombre de photons N émis en 1min par un pointeur laser de 1mW / 633 nm.

d) Interprétation de l'effet photoélectrique à l'aide des photons

Considérons un photon d'énergie $E_{ph} = h\nu$ 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 $E_{ph} = h\nu$ chacun: **les quanta**.

L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon et un électron.

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

1. **L'énergie du photon est égale au travail de sortie de l'électron** $\Leftrightarrow h\nu = W_s$

L'énergie du photon suffit tout juste à amener l'électron hors du métal à la surface.

Ceci définit la **fréquence seuil du métal** :

$$\nu_s = W_s/h$$

2. **L'énergie du photon est inférieure au travail de sortie** $\Leftrightarrow h\nu < W_s \Leftrightarrow \nu < \nu_s$

L'énergie $h\nu$ 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** $\Leftrightarrow h\nu > W_s \Leftrightarrow \nu > \nu_s$

L'électron capte l'énergie $h\nu$. 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 .

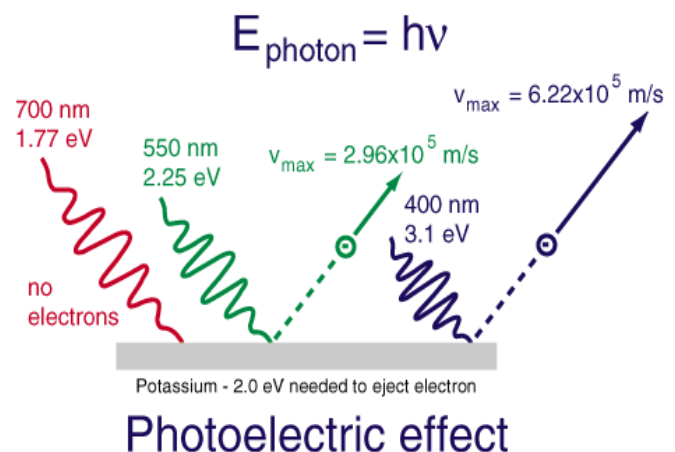
E_c et la vitesse **non relativiste** de l'électron est d'autant plus élevé si ν est élevé.

$$E_c = h\nu - W_s = h\nu - h\nu_s = h(\nu - \nu_s) \quad \text{Relation d'Einstein (Prix Nobel 1921)}$$

Ex.: Faire les calculs pour l'exemple illustré.

Expérience pour mesurer l'énergie cinétique en fonction de ν .

Link : <https://phet.colorado.edu/fr/simulation/legacy/photoelectric>



2. Aspect ondulatoire des particules : la diffraction des électrons

Considération préliminaire :

De Broglie était frappé par l'analogie qui existe entre un instrument à corde qui présente des fréquences de vibration bien déterminées correspondant à des ondes stationnaires :

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

et les niveaux énergétiques des électrons dans l'atome de Bohr. Ceci suggère que l'électron doit aussi avoir une nature ondulatoire pour expliquer les états d'énergie stationnaires :

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

a) 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 ν par la relation :

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

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

Selon la relativité restreinte: $E = m \cdot c^2$ où m = masse du photon à la vitesse c
 $E = (m \cdot c) \cdot c$ où $m \cdot c = p$ quantité de mouvement du photon
 $E = pc$ (2) cf C1 p. 15

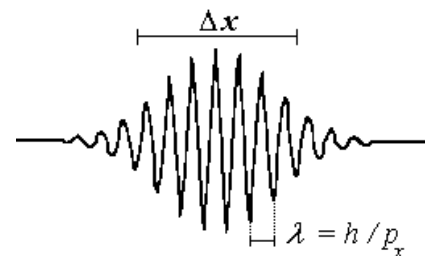
(1) et (2) donnent : $h \frac{c}{\lambda} = pc$

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

b) Longueur d'onde et quantité de mouvement d'une particule matérielle

En cherchant des analogies entre onde « matérielle » et particule d'une part et entre onde électromagnétique et photon d'autre part, **Louis de Broglie** présente en **1924** (prix Nobel en 1927) la **théorie** suivante :

À toute particule, de quantité de mouvement p, on peut associer une onde de longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{p}$

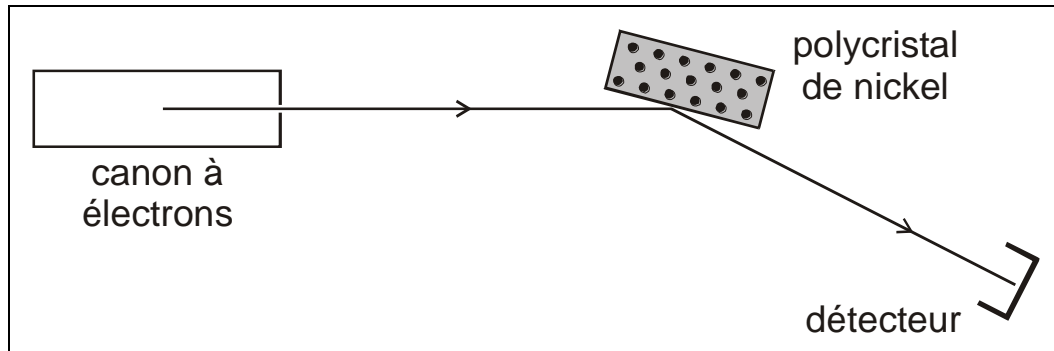


Le meilleur choix pour obtenir une longueur d'onde mesurable sont des électrons $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ accéléré avec quelques kV.

En effet comme $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est très petit, on doit avoir m et p très petit pour obtenir une longueur d'onde mesurable de l'ordre du nm.

Cette théorie de de Broglie a été vérifiée expérimentalement en 1926 par l'**expérience de Davisson et Germer** qui ont envoyé un faisceau d'électrons sur un cristal de nickel.

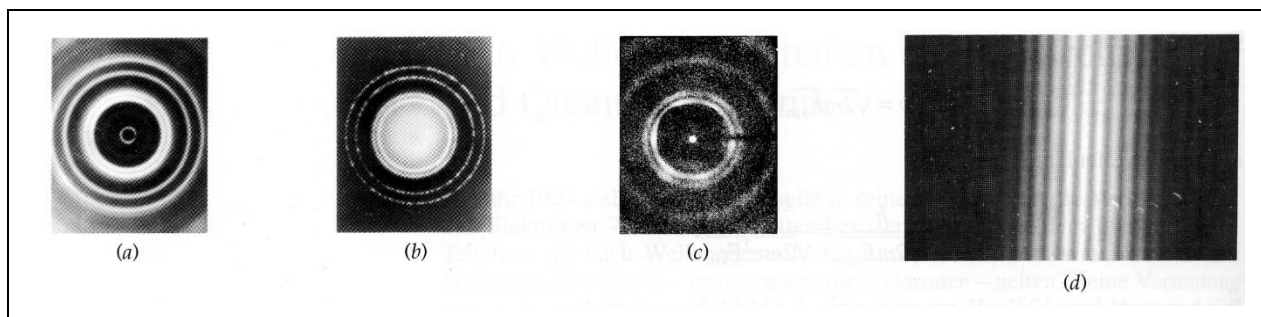
Ils ont observé à la sortie du cristal que l'impact des électrons sur une plaque photographique formait une figure de diffraction (= caractéristique des ondes lorsque la taille de l'obstacle diffractant correspond à celle de la longueur d'onde).



En classe on peut visualiser le phénomène avec le tube de Braun où les électrons accélérés sont diffractés par une cible en graphite qui présente un réseau cristallin hexagonal.

<http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/quantenobjekt-elektron/versuche>

D'autres expériences de diffraction par un cristal utilisant d'autres particules et des expériences d'interférence par la double fente de Young ont confirmé les hypothèses de de Broglie.



Figures de diffraction de (a) rayons X et (b) électrons, diffractés sur une feuille d'aluminium et (c) neutrons diffractés par du cuivre polycristalin. (d) Figure d'interférence d'un faisceau d'électrons par une double fente.

De nombreuses expériences montrent donc que :

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 $\lambda = h/p$, c'est-à-dire lorsque la masse respectivement la quantité de mouvement de la particule est très petite.

Ceci explique pourquoi il est impossible de mettre en évidence le caractère ondulatoire d'un corps macroscopique. (Onde corpuscule exercice 2)