

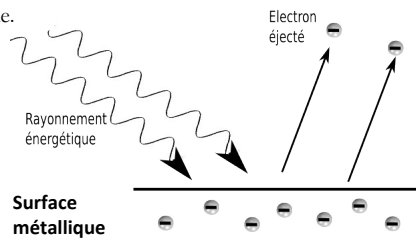
APPROCHE DOCUMENTAIRE L'EFFET PHOTOELECTRIQUE

Objectif :

- décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.

DOCUMENT 1 : DÉFINITION DE L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

Effet photo-électrique [quant.] (angl. *Photoelectric effect*). Ejection d'électrons par une surface métallique soumise à un rayonnement électromagnétique. Cet effet est mis en œuvre dans certains photo-détecteurs et dans les panneaux solaires par exemple.



Il fut découvert accidentellement en 1887 par Heinrich Hertz (1857-1894) et joua ensuite un rôle crucial dans l'avènement de la physique quantique. En effet, l'électromagnétisme classique ne parvenait pas à expliquer les caractéristiques de ce phénomène :

- Il existe un seuil en fréquence en deçà duquel l'effet photoélectrique disparaît ;
- L'énergie cinétique des électrons émis est indépendante de l'intensité lumineuse ;
- Au-delà de la fréquence seuil, l'énergie cinétique maximale des électrons croît linéairement avec la fréquence ν du rayonnement utilisé ;
- Au-delà de la fréquence seuil, les électrons commencent à être émis quasi-instantanément, indépendamment de l'intensité lumineuse.
- Au-delà de la fréquence seuil, le nombre d'électrons émis par unité de temps (le courant électrique) est proportionnel à l'intensité lumineuse.

Plusieurs de ces particularités furent découvertes par **Philipp Lenard** (1962-1947), **Albert Einstein** (1879-1955) en proposant une explication en 1905 basée sur l'hypothèse selon laquelle la lumière serait constituée de quanta d'énergie $E=h\nu$, où h désigne la constante de Planck. Cette hypothèse fut largement acceptée après 1916, grâce à la minutieuse vérification expérimentale faite par **Robert Millikan** (1868-1953). Trois prix Nobel furent décernés en rapport avec cet effet (Lenard en 1905, Einstein en 1921, et Millikan en 1923).

Extrait du Dictionnaire de physique, édition De Boeck.

DOCUMENT 2 : EXTRAIT D'UN ARTICLE D'ALBERT EINSTEIN

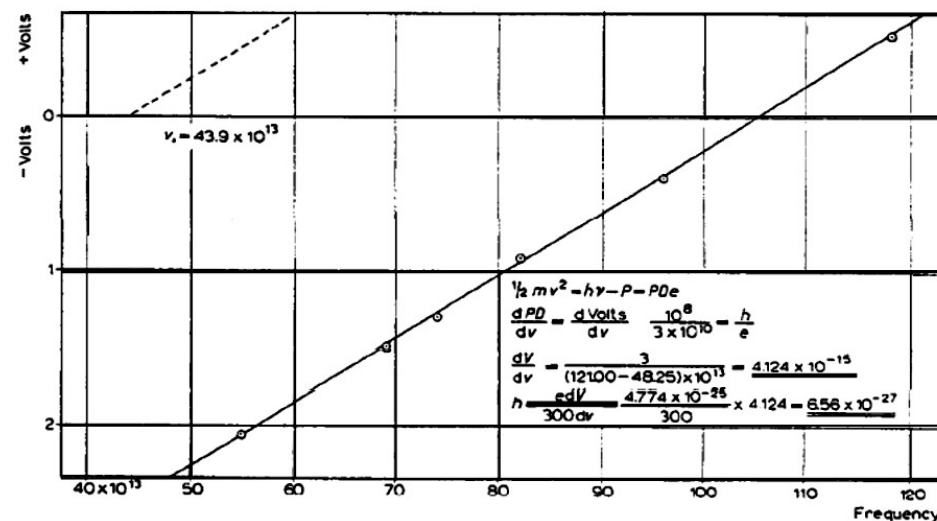
It seems to me that the observation associated with black body radiation, fluorescence, the photoelectric effect, and other related phenomena associated with the emission or transformation of light are more readily understood if one assumes that the energy of light is discontinuously distributed in space.

In accordance with the assumption to be considered here, the energy of a light ray spreading out from a point is not continuously distributed over an increasing space, but consists of a finite number of energy quanta which are localized at points in space, which move without dividing, and which can only be produced and absorbed as complete units.

Extrait de "On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light", Albert Einstein

DOCUMENT 3 : EXTRAIT DU DISCOURS DE HENRY MILLIKAN LORS DE LA REMISE DE SON PRIX NOBEL DE PHYSIQUE EN 1923

After ten years of testing and changing and learning and sometimes blundering, all efforts being directed from the first toward the accurate experimental measurement of the energies of emission of photoelectrons, now as a function of temperature, now of wavelength, now of material, this work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof in 1914 of the exact validity, within narrow limits of experimental error, of the Einstein equation, and the first direct photoelectric determination of Planck's h . The accuracy obtained was about 0.5% which was much the best available at the time. The following figure, which represents the most accurate work done on an individual metal (sodium), will illustrate the entire lack of ambiguity of the result.



DOCUMENT 4 : EXPÉRIENCE DE PHILIPP LENARD SUR L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

➔ Bref historique

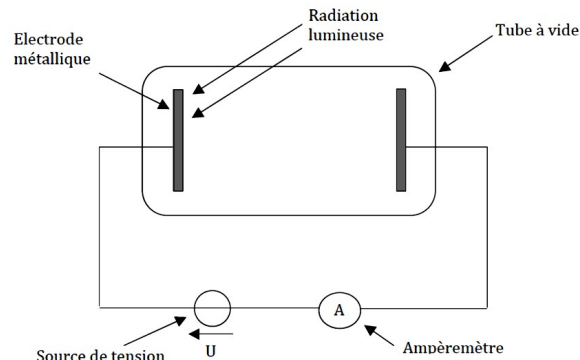
1839 : Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en étudiant des cellules électrolytiques soumises à de la lumière. Bien que ce ne soit pas rigoureusement la même chose que l'effet photoélectrique, ce travail a initié l'idée d'une relation entre la lumière et les propriétés électroniques des métaux.

1887 : Heinrich Hertz observe l'effet photoélectrique « accidentellement » alors qu'il s'intéressait à la production d'ondes électromagnétiques (l'existence de celles-ci venant d'être prouvée par l'écossais James Clark Maxwell). Peu après, d'autres physiciens (notamment Hallwachs) montrent, très clairement qu'une plaque de Zinc soumise à des rayons UV se charge positivement.

1902 : Lenard (grâce à l'expérience décrite ci-dessous) observe que l'énergie cinétique des électrons individuels émis par effet photoélectrique augmente avec la fréquence de la lumière utilisée, ce qui est en contradiction avec la théorie ondulatoire de la lumière (Maxwell) qui prédirait que l'énergie des électrons serait proportionnelle à l'intensité de la lumière.

→ Expérience de Lenard

On place deux plaques métalliques (électrodes) face à face dans un tube à vide. Sur une des deux électrodes, on envoie de la lumière, de fréquence et d'intensité réglable. De plus, grâce à une source de tension, on peut aussi appliquer une tension réglable U entre les deux électrodes. Enfin, un ampèremètre permet de mesurer le courant qui circule dans le circuit.



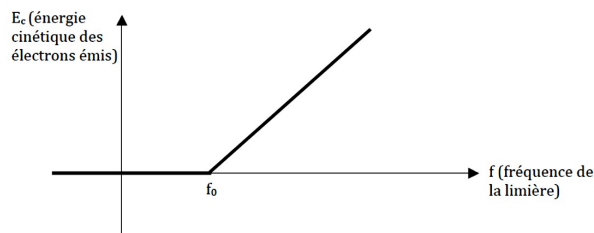
→ Intérêt du montage

Si on observe un courant, c'est que des électrons se déplacent dans le vide de l'électrode de gauche vers celle de droite. Ces électrons auront nécessairement été arrachés par la lumière à l'électrode de gauche. De plus, quand on applique une tension U positive (dans le sens indiqué sur le schéma), ces électrons ont tendance à être attirés par l'électrode de gauche (car celle-ci est reliée au côté + de la source de tension). Donc, pour qu'ils arrivent à traverser le tube à vide (et que l'on observe un courant), il faudra qu'ils aient acquis initialement une énergie cinétique supérieure à l'énergie potentielle qui fait qu'ils sont attirés vers l'électrode de gauche. Cette énergie potentielle vaut $E_p = eU$ où U est la tension qui règne entre les plaques et e est la valeur absolue de la charge d'un électron : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Cet appareil permet donc non seulement de savoir si la lumière est capable d'arracher des électrons à la plaque métallique, mais aussi de savoir quelle est l'énergie cinétique (donc la vitesse) des électrons après avoir été arrachés.

→ Résultats expérimentaux

- Pour un métal donné, il existe une fréquence minimale (ou « fréquence seuil », notée ν_0) de la lumière en dessous de laquelle aucun électron n'est émis par la plaque. En dessous de la fréquence seuil, quelle que soit l'intensité de la lumière utilisée, aucun électron ne sera arraché.

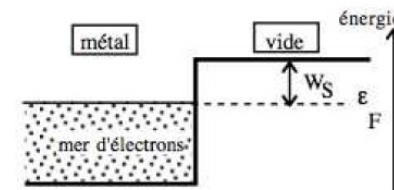
Au-dessus de la fréquence seuil, le nombre d'électrons arrachés sera proportionnel à l'intensité de la lumière. Ce comportement est très surprenant car on sait que l'énergie totale transportée par une onde ne dépend que de l'amplitude de celle-ci (donc, de son intensité, s'il s'agit d'une onde lumineuse).



- Si on augmente la fréquence de la lumière au-delà de la fréquence seuil, l'énergie cinétique des électrons arrachés augmente. Plus précisément on obtient une courbe expérimentale à l'allure de la courbe ci-dessus
- Au-delà de la fréquence seuil, il existe une contre tension négative $-V_0$ (appelée potentiel d'arrêt) à partir de laquelle le courant mesuré dans le circuit est nul.

DOCUMENT 5 : INTERPRÉTATION DE L'EXPÉRIENCE DE LENARD PAR ALBERT EINSTEIN

Avant d'exposer l'interprétation d'Einstein, il convient de préciser la situation d'un électron dans un métal. Comme les métaux sont conducteurs, il est licite d'imaginer qu'ils contiennent des électrons qui sont, sinon libres, du moins assez mobiles pour donner lieu au passage d'un courant lorsqu'une différence de potentielle est appliquée. Très nombreux, ces électrons (dits de conduction) forment une sorte de fluide appelé **gaz de Fermi** et, pour des raisons subtiles, sont tenus, grossièrement parlant, d'avoir des énergies différentes ; construire le métal avec ses électrons, c'est donc empiler ces derniers dans différents états d'énergie croissante, constituant ce que l'on appelle la mer de Fermi. L'image que l'on peut se faire est celle d'un récipient partiellement rempli, l'axe vertical mesurant l'énergie à partir d'une origine donnée (figure ci-contre). La surface de la mer de Fermi est située à une énergie appelée niveau de Fermi, noté ϵ_F .



Ainsi, ces électrons ne peuvent pas sortir spontanément du métal : pour les extraire, il faut leur fournir d'une façon ou d'une autre une certaine énergie. Évidemment, ce sont les électrons situés à la surface de la mer de Fermi qui peuvent sortir le plus facilement. On appelle travail de sortie, noté W_s (S pour sortie), l'énergie minimale à fournir pour extraire un électron du métal ; en énergie, c'est donc la distance entre le niveau de Fermi et l'énergie d'un électron extrait du métal et éjecté sans vitesse initiale. Cette énergie vaut typiquement quelques eV ; en posant $W_s = |e|V_s$, on définit le potentiel de sortie V_s ($W_s = 1,23 \text{ eV}$ donne $V_s = 1,23 \text{ V}$).

Une propriété cruciale de l'effet photo-électrique est l'existence de la fréquence seuil ν_0 , qui donne un fonctionnement par tout ou rien. En se souvenant de Planck qui avait introduit, précisément à propos du rayonnement électromagnétique, des quantités finies d'énergie $h\nu$ pour venir à bout de la catastrophe ultraviolette, Einstein fit le rapprochement entre cette brique élémentaire disponible et la fréquence minimale pour que le phénomène se produise. C'est ainsi qu'Einstein en vint à proposer qu'un quantum d'énergie élémentaire présent dans le rayonnement électromagnétique est lié à sa fréquence ν . Comme à l'époque l'hypothèse assez obscure de Planck passait pour un simple artifice mathématique utilisé pour se sortir de la catastrophe ultraviolette – à commencer pour Planck lui-même – la proposition d'Einstein peut être considéré comme un nouveau grand pas en avant. Dans le droit-fil du travail de Planck, Einstein admet donc une simple proportionnalité entre l'énergie d'un quantum de lumière et la fréquence de l'onde, la constante de proportionnalité étant précisément celle que Planck avait introduite :

$$E = h\nu$$

Tout comme celle de Planck, l'hypothèse d'Einstein revient clairement à admettre que les échanges d'énergie entre lumière et matière impliquent une quantité indivisible et se font donc forcément par multiples entiers de cette quantité. Ceci revient bien à dire que la lumière est constituée de petits corpuscules indivisibles, depuis appelés photons. Compte tenu des contextes très différents qui virent cette relation proposée, il est juste d'appeler la dernière relation « **relation de Planck-Einstein** ».

Ainsi, selon Einstein, l'énergie apportée par la lumière monochromatique au métal est constituée de petits quanta de lumière indivisibles, d'énergie $E = h\nu$. Maintenant, de deux choses l'une : ou bien chacun de ces petits grains a une énergie supérieure à W_s et alors, a priori, un photon a la capacité d'éjecter l'électron hors du métal, avec une certaine vitesse initiale, ou bien l'énergie de chaque photon est inférieure à W_s et dans ce cas aucun électron ne peut être extrait.

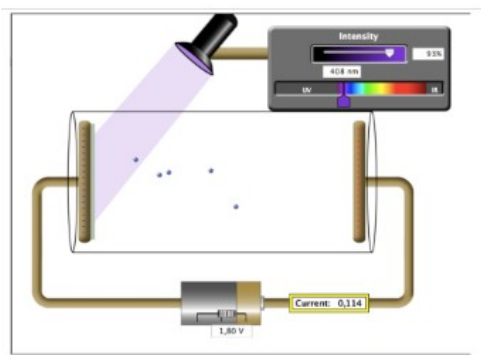
Cela étant admis, il est facile d'écrire l'équation de conservation de l'énergie pour chaque événement élémentaire. Avant, il y a un photon d'énergie $h\nu$ et un électron lié au métal, avec une énergie de liaison ($-W_s$); après, le photon n'existe plus - on dit qu'il a été absorbé - et on se retrouve avec un électron libre (dans le vide) de vitesse v ; la conservation de l'énergie (Avant=Après) s'écrit :

$$h\nu = W_s + \frac{1}{2}mv^2$$

qui constitue l'**équation d'Einstein pour l'effet photoélectrique**. Dans ces écritures, c'est l'énergie cinétique « initiale » de l'électron qui apparaît, celle qu'il a juste au sortir du métal et sans préjuger de ce qui lui arrive par la suite.

Clairement, cette équation correspond à l'éjection d'un électron initialement situé à la surface de la mer de Fermi. D'un autre côté, sur la simple considération de la conservation de l'énergie, rien n'interdit a priori l'éjection d'électrons situés en profondeur dans la mer de Fermi, émis avec vitesse initiale inférieure à celle définie par la dernière relation encadrée. La profondeur en énergie de la mer concernée par une radiation de fréquence donnée est égale à $h\nu - W_s$, les électrons éjectables les plus profonds étant émis avec une vitesse quasi-nulle. En définitive, l'énergie $\frac{1}{2}mv^2$ apparaissant dans la dernière équation est l'énergie maximale des photo-électrons, ceux-ci étant distribués en énergie, de zéro jusqu'à cette énergie maximale.

DOCUMENT 6 : ANIMATION SUR INTERNET PERMETTANT DE MIEUX COMPRENDRE L'EXPÉRIENCE : <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>



On peut vérifier sur cette animation que :

- pour un métal donné, il existe une fréquence seuil ν_s : si la lumière a une fréquence ν supérieure à ν_s , l'effet se produit instantanément. Si la lumière a une fréquence ν inférieure à ν_s , le phénomène ne se produit pas, même au bout d'un temps très long.

Pour vérifier cela sur l'animation, choisir un matériau, et pour une tension nulle entre les plaques, faire varier l'intensité et la longueur d'onde de la lumière.

- au-delà de la fréquence seuil, il existe une contre tension $-V_0$ (appelée potentiel d'arrêt) à partir de laquelle le courant mesuré dans le circuit est nul.

Pour vérifier cela sur l'animation, choisir une fréquence pour laquelle il y a émission d'électrons ($\nu > \nu_s$). Faire varier alors la tension appliquée entre les plaques, et regarder ce qui se passe au niveau de l'émission des électrons. On cherchera en particulier à visualiser le cas limite où la tension diminue juste assez pour que les électrons émis rebrousse chemin.

DOCUMENT 7 : TRAVAUX D'EXTRACTION POUR DIVERS MÉTAUX

Métal	Cs	Rb	K	Na	Ca	Mg	Zn	Fe	Ni
Potentiel de sortie W (en eV)	1,9	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4	3,4	3,8	5,0

Remarque : les travaux d'extraction sont donnés en « électrons volts » eV qui est une unité d'énergie très utilisée quand on s'intéresse à des « petites » énergies (typiquement à l'échelle d'un seul atome ou d'un seul électron). $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

FICHE D'EXPLOITATION

→ Un peu d'histoire

- 1 Quel physicien avait, avant Einstein, émis l'idée que l'énergie lumineuse pouvait être constituée de particules individuelles (de la même façon que la matière est constituée d'atomes) ? Dans quel contexte ?
- 2 Le terme « photon » a été introduit après Einstein. Comment Einstein appelait-il ces particules ?
- 3 Combien de prix Nobel ont été attribués en lien avec l'Effet photoélectrique ?

→ Nécessité de la notion de photon

- 4 Expliquer clairement et sans calcul, pourquoi l'interprétation classique ne permet pas d'expliquer :
 - a l'existence d'une fréquence seuil ν_s ;
 - b l'instantanéité de l'effet photoélectrique.
 - c le fait que l'énergie cinétique initiale maximale des photoélectrons croît linéairement avec la fréquence et non l'intensité ;
- 5 A l'aide de l'interprétation d'Einstein, expliquer l'existence d'une fréquence seuil ν_s .
- 6 Soit une photocathode de surface $S = 1 \text{ cm}^2$, exposée au rayonnement d'une simple lampe jaune ($\lambda = 580 \text{ nm}$) de puissance $P = 100 \text{ W}$ située à $d = 1 \text{ m}$ de distance. Calculer le nombre de photons N arrivant sur la photocathode, par seconde. Conclure sur l'instantanéité du phénomène.
- 7 a. Montrer que l'équation d'Einstein s'écrit $h(\nu - \nu_s) = \frac{1}{2}mv^2$.
 - b. En déduire que l'interprétation d'Einstein traduit le fait que l'énergie cinétique initiale maximale des photoélectrons croît linéairement avec la fréquence et non l'intensité ;
 - c. Quelle est la valeur de la pente de la droite dans la courbe représentative de E_c en fonction de f dans l'expérience de Lenard ?

- 8 A l'aide de l'interprétation d'Einstein, expliquer l'existence d'une contre tension $-V_0$. On montrera que $|V_0| = \frac{h}{e}(\nu - \nu_s)$.

- 9 A l'aide de l'interprétation d'Einstein, justifier le fait qu'une augmentation de l'intensité incidente (qui correspond à une augmentation du nombre de petits grains lumineux bombardant la photocathode par unité de temps), entraîne une augmentation du courant électrique.

→ Un peu de calcul pour la route...

- 10 Calculer la fréquence seuil de la lumière permettant une émission photoélectrique pour du Zinc, pour du Potassium et pour du Césium. Dans chaque cas, donner la longueur d'ondes correspondantes puis indiquer de quel type de radiation il s'agit : UV, lumière visible (quelle couleur) ? ...
- 11 On réalise l'expérience de Lenard avec une plaque de Zinc, en utilisant une lumière ultraviolette de longueur d'onde 200 nm .
 - a Y aura-t-il des électrons arrachés ?
 - b Si oui, quelle sera leur énergie cinétique juste après avoir été arrachés ?
 - c Si on veut empêcher ces électrons d'atteindre l'autre électrode, quelle tension U faut-il appliquer entre les deux électrodes ?

APPROCHE DOCUMENTAIRE

ONDES DE MATIERE

Objectif : ▪ Décrire un exemple d'expérience illustrant la notion d'onde de matière.

En 1924, le jeune français Louis de Broglie (prix Nobel en 1929 à seulement 37 ans), en soutenant sa thèse, énonce un postulat qui va révolutionner la physique, en particulier notre conception de la matière. Cette activité propose d'analyser deux expériences qui valident le postulat de Louis de Broglie. La première est historique : c'est elle qui, en 1927, fut la première à confirmer l'hypothèse (jusque-là uniquement théorique) de Louis De Broglie. La deuxième est plus récente et décrit la diffraction des atomes d'hélium par des fentes d'Young (1991).

1. LE POSTULAT DU FRANÇAIS LOUIS DE BROGLIE

DOCUMENT 1 : ONDES DE MATIERE

En 1905, Albert Einstein et Max Planck postulent que la lumière se propage par quanta d'énergie, les photons. Cette hypothèse à laquelle Planck lui-même ne croit pas vraiment permet d'interpréter nombre de phénomènes observés mais incompris à l'époque : le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique, etc.

En 1913, Niels Bohr énonce que l'énergie des atomes aussi est quantifiée : cette hypothèse lui permet d'interpréter les spectres de raies d'émission.

Cependant toutes ces hypothèses et les lois qui en découlent sont *phénoménologiques** et non liées entre elles. En particulier la quantification de l'énergie des atomes semble sans lien avec celle de l'énergie transportée par la lumière, ce qui laisse Albert Einstein lui-même très sceptique.



Cependant un jeune étudiant en doctorat de physique nommé Louis de Broglie soutient en 1924 une thèse qui est aujourd'hui considérée comme la première pierre de la théorie quantique. Il énonce que :

« À toute particule matérielle de masse m et de vitesse v doit être associée une onde de matière de longueur d'onde :

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

h étant la constante de Planck et p la quantité de mouvement de la particule. »

Albert Einstein, lorsqu'il lit la thèse de Louis de Broglie, déclare que ce jeune physicien a « levé un coin du grand-voile »...

DOCUMENT 2 : EXTRAIT DU DISCOURS DE LOUIS DE BROGLIE LORS DE LA REMISE DE SON PRIX NOBEL « POUR SA DÉCOUVERTE DE LA NATURE ONDULATOIRE DES ÉLECTRONS »

When in 1920 I resumed my studies of theoretical physics which had long been interrupted by circumstances beyond my control, I was far from the idea that my studies would bring me several years later to receive such a high and envied prize as that awarded by the Swedish Academy of Sciences each year to a scientist: the Nobel Prize for Physics. What at that time drew me towards theoretical physics was not the hope that such a high distinction would ever crown my work; I was attracted to theoretical physics by the mystery enshrouding the structure of matter and the structure of radiations, a mystery which deepened as the strange quantum concept introduced by Planck in 1900 in his research on black-body radiation continued to encroach on the whole domain of physics. To assist you to understand how my studies developed, I must first depict for you the crisis which physics had then been passing through for some twenty years.

For a long time physicists had been wondering whether light was composed of small, rapidly moving corpuscles. This idea was put forward by the philosophers of antiquity and upheld by Newton in the 18th

century. After Thomas Young's discovery of interference phenomena and following the admirable work of Augustin Fresnel, the hypothesis of a granular structure of light was entirely abandoned and the wave theory unanimously adopted. [...]

Some thirty years ago, physics was hence divided into two: firstly the physics of matter based on the concept of corpuscles and atoms which were supposed to obey Newton's classical laws of mechanics, and secondly radiation physics based on the concept of wave propagation in a hypothetical continuous medium, i.e. **the light ether** or electromagnetic ether. But these two physics could not remain alien one to the other; they had to be fused together by devising a theory to explain the energy exchanges between matter and radiation - and that is where the difficulties arose.

While seeking to link these two physics together, imprecise and even inadmissible conclusions were in fact arrived at in respect of the energy equilibrium between matter and radiation in a thermally insulated medium: matter, it came to be said, must yield all its energy to the radiation and so tend of its own accord to absolute zero temperature! This absurd conclusion had at all costs to be avoided. By an intuition of his genius Planck realized the way of avoiding it: instead of assuming, in common with the classical wave theory, that a light source emits its radiation continuously, it had to be assumed on the contrary that it emits equal and finite quantities, quanta. The energy of each quantum has, moreover, a value proportional to the frequency ν of the radiation. It is equal to $h\nu$, h being a universal constant since referred to as Planck's constant.

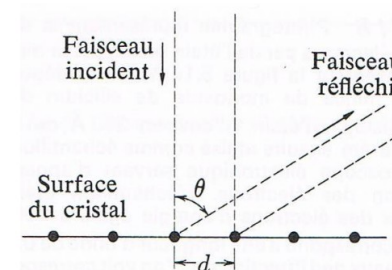
When I started to ponder these difficulties two things struck me in the main. Firstly the light-quantum theory cannot be regarded as satisfactory since it defines the energy of a light corpuscle by the relation $E = h\nu$ which contains a frequency ν . Now a purely corpuscular theory does not contain any element permitting the definition of a frequency. This reason alone renders it necessary in the case of light to introduce simultaneously the corpuscle concept and the concept of periodicity.

1. DIFFRACTION D'ÉLECTRONS

DOCUMENT 3 : 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 :

- 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



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

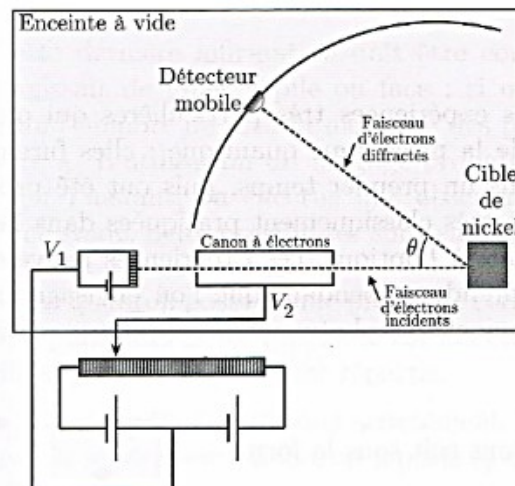
$$d \times \sin \theta = k\lambda \quad \text{où } k \text{ est un entier relatif}$$

Cette relation est appelée relation de Bragg (en l'honneur de William Bragg, Prix Nobel en 1915 à seulement 25 ans !). 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 $\lambda \approx 0,1 \text{ nm}$ comme les distances interatomiques dans un cristal.

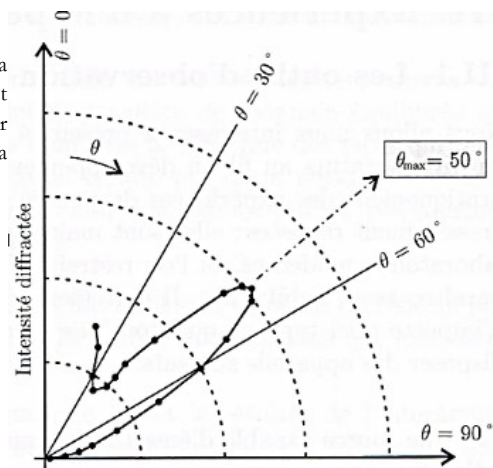
La diffraction des rayons X est encore de nos jours une technique importante d'exploration des structures cristallines.

DOCUMENT 4 : L'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 Davison (Prix Nobel en 1937) 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.



On observe que les électrons sont diffractés par la cible principalement dans une direction privilégiée, qui est prévue par la relation de Bragg, à condition de considérer que la longueur d'onde des électrons est donnée par la relation de de Broglie.

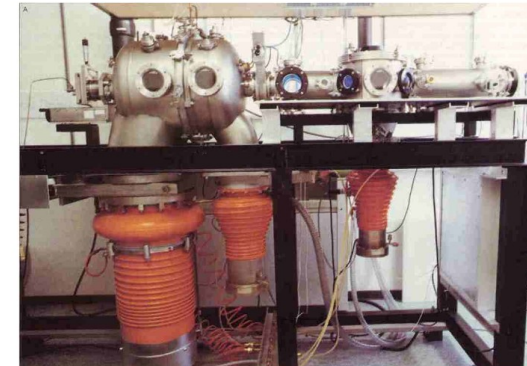


Cette expérience prouve donc que les électrons ont un comportement ondulatoire, comme la lumière ou les rayons X. Elle permet aussi de vérifier quantitativement la validité de la relation de de Broglie.

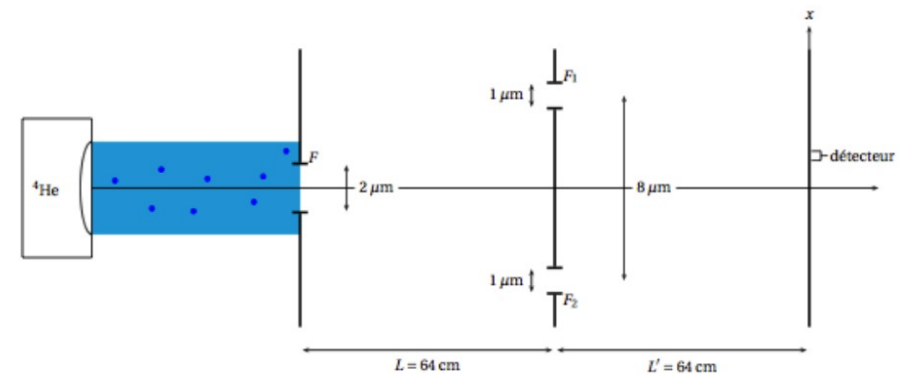
2. INTERFÉRENCES ENTRE ATOMES D'HÉLIUM (1991)

DOCUMENT 5 : PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

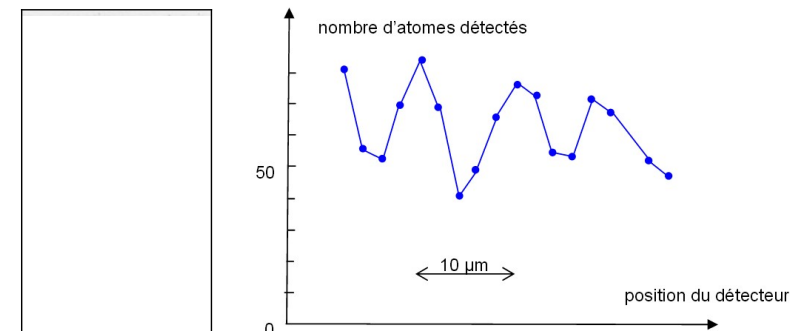
En 1991, O. Carnal et J. Mlynek publient un article dans la revue scientifique Physical Review Letters. Voici la photographie du dispositif expérimental de leur expérience. Les dispositifs de couleur orange sont des pompes permettant d'obtenir un très bon vide dans l'enceinte supérieure où se déroule l'expérience.



DOCUMENT 6 : SCHÉMA TRÈS SIMPLIFIÉ DE L'EXPÉRIENCE



DOCUMENT 7 : RÉSULTAT DE L'EXPÉRIENCE



FICHE D'EXPLOITATION

→ Un peu d'Histoire

- 1 Louis de Broglie, dans son discours, évoque « the light ether ». Qu'était « l'éther luminifère » au XIX^{ème} siècle ? Expliquer brièvement. Quel grand physicien, grâce à son expérience devenue très célèbre, prouve la non-existence de l'Ether ?
- 2 Quelles étaient les deux grandes théories de la physique (« the two physics », selon Louis De Broglie) jusqu'en 1900 ? Donner les grands physiciens associés à ces deux théories.
- 3 Quel est le phénomène physique qui a contraint les physiciens à concilier ces deux théories dans les années 1900 ?
- 4 Quelle raison principale a conduit Louis De Broglie à penser que l'électron peut se comporter comme une onde ou un corpuscule ?

→ Expérience de Davisson et Germer (1927)

- 5 A l'aide d'une analogie avec la démonstration de la loi de Descartes pour la réfraction par le modèle ondulatoire, démontrer la relation de Bragg.
- 6 Les électrons, avant d'arriver sur le cristal, sont accélérés par une différence de potentiel U. Par analyse dimensionnelle, trouver la relation entre U, la charge d'un électron e, et son énergie cinétique E_c. On cherchera E_c = f(e, U) et on prendra la constante sans dimension égale à 1.
- 7 Davisson et Germer cherchait à prouver, dans leur expérience, que les électrons pouvaient être diffractés comme les rayons X. Quel est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des rayons X ?
- 8 Estimer la différence de potentielle U que Davisson et Germer ont du appliquer aux électrons pour que ceux-ci, si la relation de De Broglie était vraie, aient une longueur d'onde du même ordre de grandeur que celle des rayons X. Pour les calculs, on considérera que les électrons ne sont pas relativistes.
- 9 Vérifier, avec la différence de potentielle trouvée, qu'il était justifié de considérer les électrons comme non relativistes.
- 10 A l'aide des résultats expérimentaux de Davisson et Germer, Calculer la distance interatomique dans le cristal sachant que le pic représenté est le seul pic observé d'ordre non nul.
- 11 A votre avis, quel est le principe de fonctionnement du détecteur ? Quelle grandeur physique représente en fait l'"intensité diffractée" ?

→ Interférences entre atomes d'Hélium (1991)

- 12 Comment varie la température d'un gaz avec la pression ?
- 13 Quel est l'intérêt de faire « un très bon vide » pour réaliser l'expérience d'interférences entre atomes d'hélium ? On donne la vitesse d'agitation thermique d'une particule de masse m: $v^2 = \frac{3k_B T}{m}$ avec k_B la constante de Boltzmann.
- 14 Calculer la longueur d'onde des atomes d'hélium dans l'expérience de Carnal et Mlynek pour une vitesse typique égale à v=9,70.10² m.s⁻¹. On prendra m_{He} = 6,64.10⁻²⁷kg et h=6.63.10⁻³⁴J.s.
- 15 Justifier, à l'aide de la théorie de la diffraction par une fente appliquée aux atomes d'hélium, que ceux-ci, une fois passé par la fente F, passent bien par les deux fentes F₁ et F₂.
- 16 Le document 7 représente le nombre d'atomes détectés en fonction de la position du détecteur. Justifier en quoi cette répartition illustre un phénomène d'interférences atomiques.
- 17 Dans le cas des fentes d'Young éclairées par une onde lumineuse monochromatique de longueur d'onde λ, l'interfrange est la distance séparant deux franges consécutives de même nature (claires ou sombres), et vaut $i = \frac{\lambda D}{a}$, D étant la distance fente écran et a la distance entre les deux fentes. En transposant cette définition de l'interfrange au cas des interférences atomiques, donner une évaluation de l'interfrange i grâce au document 6, et estimer l'incertitude sur i. En déduire une estimation de la longueur d'onde des atomes d'Hélium, avec son incertitude. Est-ce cohérent avec la valeur théorique calculée à la question 14 ?
- 18 Pourquoi est-il plus difficile de réaliser l'expérience des fentes d'Young avec des atomes qu'avec des électrons ?
- 19 Des chercheurs de l'université de Vienne ont pu réaliser des interférences avec des molécules de très grande taille : en 1999, le fullerène C₆₀, molécule en forme de ballon de football contenant 720 protons, et récemment des molécules dérivées de tétraphénylporphyrine de masse moléculaire contenant plus de 5000 protons ! En quoi est-ce réellement impressionnant ? On donne m_p=1,66.10⁻²⁷kg, et le lien entre vitesse d'une particule et température : $v^2 = \frac{3k_B T}{m}$.