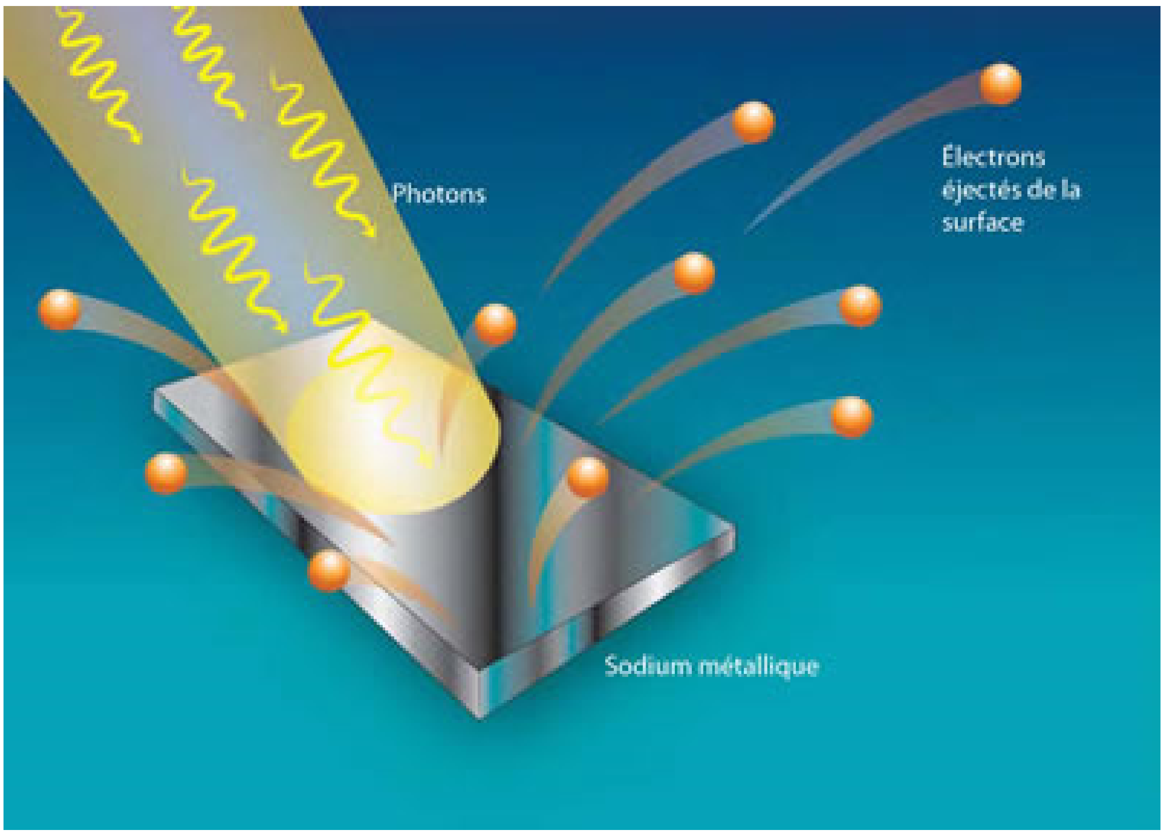
10 ONDES ET PARTICULES

De la lumière ayant une longueur d'onde de 310 nm arrive sur du sodium (travail d'extraction = 2,46 eV). Quelle est la vitesse maximale des électrons éjectés ?



boson.ulb.ac.be/la-lumiere-vue-comme-une-particule/

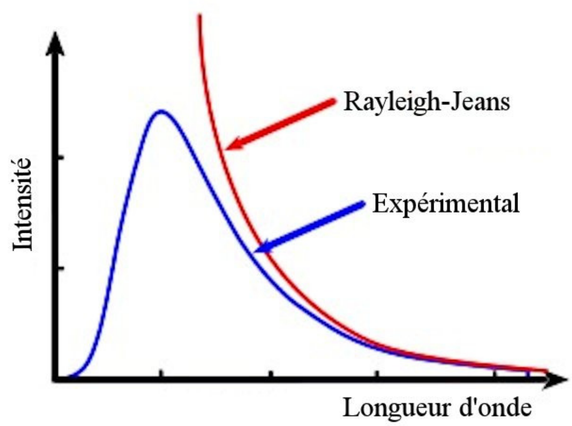
Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

10.1 LES PHOTONS

La loi de Rayleigh-Jeans

On a vu au chapitre précédent que les corps chauds émettent du rayonnement. Il y avait cependant un sérieux problème quand on tentait de modéliser ce rayonnement. À la base, le principe est simple. Les atomes de l'objet chaud sont en oscillations à cause de la température. Avec cette oscillation, il y a des particules chargées qui accélèrent, ce qui crée des ondes électromagnétiques. Plus il fait chaud, plus les oscillations sont importantes et plus le rayonnement est important. Pour les calculs théoriques, on suppose que l'objet est en équilibre avec son environnement et qu'il absorbe tout le rayonnement qui arrive sur lui (d'où le nom de *rayonnement du corps noir* qu'on donne souvent à ce phénomène).

Mais les calculs, faits à partir de 1860 (mais de façon plus soutenue après 1890), n'arrivaient pas à reproduire les résultats expérimentaux. La formule théorique, dite formule de Rayleigh-Jeans, arrivait plutôt à une loi du rayonnement montrée sur la figure. Ce qui était encore plus embêtant, c'est que l'aire sous la courbe théorique (qui représente la puissance émise) était infinie ! Cela signifie que les objets se refroidiraient instantanément dans un immense sursaut de rayonnement émis. Ce n'est vraiment pas ce qui se passe. On appelait ce résultat *la catastrophe ultraviolette* puisque la formule théorique divergeait sérieusement pour les petites longueurs d'onde (ultraviolet et plus petite) alors que l'accord était meilleur pour les grandes longueurs d'onde.



uel.unisciel.fr/chimie/strucmic/strucmic_ch01/co/apprendre_ch1_11.html

Il fallait trouver une façon de réconcilier la théorie et l'expérience.

L'hypothèse de Planck

En 1900, Max Planck découvrit qu'on obtient le bon résultat si on suppose que les atomes émettent de l'énergie d'une façon très particulière. Alors que les atomes peuvent émettre n'importe quelle quantité de rayonnement dans la théorie classique, Planck affirme qu'ils doivent émettre l'énergie par paquet, qu'on appellera *quantum d'énergie* (*quanta* au pluriel). Le quantum d'énergie pour un atome en oscillation harmonique avec une fréquence f est

Quantum d'énergie d'un atome en oscillation harmonique

$$E = hf$$

où h est une constante appelée *constante de Planck* et qui vaut

Constante de Planck

$$h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}\ Js$$

(Cette valeur est exacte. Toutes les décimales après le 5 sont des 0. Il en est ainsi parce qu'en 2019, on a défini le kilogramme en donnant cette valeur à h. Pour les calculs, on va prendre la valeur de 6,626 x 10^{-34} Js.)

L'énergie du rayonnement émis par un atome doit, selon Planck, être un multiple entier du quantum d'énergie.

Énergie émise par un atome en oscillation

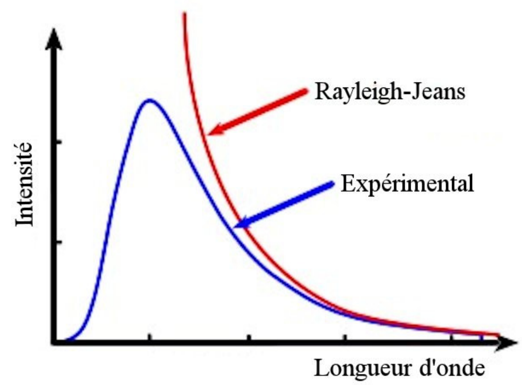
$$E = nhf$$

où n est un entier. C'est ce qu'on appelle la quantification de l'énergie.

Voyons pourquoi cette hypothèse élimine la catastrophe ultraviolette.

Pour des fréquences basses (donc de grandes longueurs d'onde), la valeur du quantum d'énergie hf est petite. Prenons des chiffres pour illustrer. Supposons que l'énergie d'oscillation de l'atome est de 100 eV et que le quantum d'énergie à cette fréquence est de 1 eV. La valeur du quantum d'énergie est alors beaucoup plus petite que l'énergie de l'atome et l'atome peut facilement émettre du rayonnement. C'est facile d'émettre 1 eV (ou 2 eV ou 3 eV… puisqu'on peut émettre un nombre entier de quanta) quand on a une énergie de 100 eV. Les atomes peuvent émettre beaucoup de quanta d'énergie, mais comme l'énergie de chaque quantum est relativement petite, l'intensité globale n'est pas si grande. C'est pourquoi la courbe n'est pas si élevée à droite sur le graphique.

Allons maintenant à des fréquences un peu plus grandes, de sorte que le quantum d'énergie vaut maintenant 5 eV. Un atome qui a une énergie de 100 eV peut facilement émettre de tels quanta d'énergie. Comme chaque quantum a plus d'énergie, le rayonnement émis est plus intense. C'est pourquoi la courbe de l'intensité (courbe bleue) monte quand la longueur d'onde diminue à droite sur le graphique.



Allons maintenant à des fréquences encore plus grandes. Supposons que hf vaut maintenant 30 eV. Un atome ayant une énergie de 100 eV peut encore émettre un quantum ou des quanta d'énergie, mais ce sera plus difficile. Plus on doit émettre une quantité importante d'énergie d'un seul coup, moins c'est probable que cela se produise. Cela commence à faire diminuer la quantité de rayonnement prévu, de sorte que la courbe du rayonnement (en bleu) commence à augmenter moins vite que ce que prévoyait la physique classique (en rouge) quand la longueur d'onde diminue.

Pour de hautes fréquences (donc de petites longueurs d'onde), le quantum d'énergie est encore plus grand. Supposons alors que hf vaut 200 eV. Il devient alors impossible qu'un atome ayant une énergie de 100 eV puisse émettre du rayonnement. Comment voulez-vous qu'un atome ayant une énergie de 100 eV émette un quantum de 200 eV ? Dans ce cas, le rayonnement est complètement éliminé. Cette impossibilité d'émettre du rayonnement de grande fréquence explique la chute brutale de la courbe à gauche du graphique. (La chute ne serait pas instantanée à 100 eV parce que cette valeur représenterait l'énergie moyenne des atomes. Certains atomes auraient plus d'énergie que cela et pourraient émettre des quanta avec une énergie plus grande que 100 eV, mais ils seront peu nombreux.)

L'hypothèse de Planck laisse donc le rayonnement ayant de grandes longueurs d'onde identique à ce qu'il était, alors qu'elle diminue le rayonnement aux fréquences moyennes et élimine le rayonnement aux basses fréquences. C'est exactement ce qu'il nous fallait pour éviter la catastrophe ultraviolette. Avec cette hypothèse des quanta et un choix judicieux de la valeur de la constante de Planck, l'accord est parfait entre la théorie et l'expérience.

(Il faut dire que Planck a fait le raisonnement inverse : il a trouvé une fonction qui était en accord avec la théorie et il a ensuite cherché ce qu'on devait supposer pour arriver à un tel résultat. Il arriva alors à la conclusion que la lumière devait être émise par quanta.)

Reste que personne ne savait pourquoi l'énergie émise devait être un nombre entier de quanta valant hf. Planck tenta pendant plusieurs années de trouver une justification, mais il n'y parvint jamais. Sans explications plausibles, plusieurs n'y voyaient qu'un truc mathématique.

L'hypothèse des photons d'Einstein

Einstein arriva, en 1905 (la même année qu'il a fait la relativité !), à un résultat très intéressant concernant la lumière. Si on enferme de la lumière dans une boite (évidemment, les côtés sont des miroirs), elle a les mêmes propriétés qu'un gaz de particules. Les résultats montrent même que ces particules ont une énergie égale à hf ! Pour Einstein, c'était plus qu'une coïncidence. Il proposa donc l'hypothèse des *photons.*

Hypothèse des photons d'Einstein

La lumière est composée de particules (les photons) dont l'énergie est

$$E_\gamma = hf$$

(Einstein utilise plutôt le terme de *quanta de lumière*. Le nom *photon* s'impose seulement à partir de 1926 quand le chimiste Lewis l'utilise, quoique c'était pour quelque chose de différent. Le terme avait été employé auparavant pour désigner les quanta de lumière par René Wurmser en 1924 et Frithiof Wolfers en 1926. Le terme a aussi été utilisé pour des concepts complètement différents par Leonard Troland en 1916 et John Joly en 1921.)

L'hypothèse des photons allait beaucoup plus loin que ce que Planck avait proposé. Pour Planck, l'énergie émise par les objets chauds se fait par bloc de *hf*, mais cela ne signifie pas nécessairement que la lumière reste en paquet ayant une énergie *hf* après l'émission. La lumière reste une onde et elle peut avoir n'importe quelle énergie. Seul le processus d'émission est quantifié selon Planck.

Pour Einstein, il y avait quantification, car on devait émettre des photons. Puisque l'énergie des photons est *hf*, cela faisait baisser l'énergie des atomes de *hf*. Une fois la lumière émise, elle restait sous forme de photons.

On peut dire que le succès ne fut pas immédiat et on peut comprendre pourquoi. Depuis 1830, tout semblait indiquer que la lumière est une onde. Les expériences d'interférence, de diffraction et de polarisation avaient convaincu tout le monde que la lumière est une onde. De plus, les équations de Maxwell montrent clairement que la lumière est une onde. Et voilà qu'Einstein vient proposer que la lumière est une particule ! Pendant près de 20 ans, Einstein fut pratiquement le seul à y croire, et lui-même douta souvent de cette hypothèse au cours de cette période. Il y avait cependant un élément qui semblait appuyer cette idée, c'est l'effet photoélectrique que nous verrons à la section suivante.

Exemple 10.1.1

Une source de 10 W émet de la lumière ayant une longueur d'onde de 600 nm. Combien de photons sont émis chaque seconde ?

Pour trouver le nombre de photons en 1 seconde, il faut connaitre la quantité d'énergie émise en 1 seconde et l'énergie d'un photon à cette fréquence. Avec ces données, on trouvera le nombre de photons avec

$$N = \frac{\text{Énergie émise en 1 seconde}}{\text{Énergie d'un photon}}$$

L'énergie émise en 1 seconde est

$$\begin{aligned} E &= Pt \\ &= 10W \cdot 1s \\ &= 10J \end{aligned}$$

L'énergie d'un seul photon est

$$\begin{aligned} E_\gamma &= hf \\ &= \frac{hc}{\lambda} \quad \text{(Puisque } v = \lambda f\text{)} \\ &= \frac{6,626\times10^{-34}\,Js\cdot 3\times10^{8}\,\frac{m}{s}}{600\times10^{-9}\,m} \\ &= 3,313\times10^{-19}\,J \end{aligned}$$

Le nombre de photons émis est donc

$$\begin{aligned} N &= \frac{\text{Énergie émise en 1 seconde}}{\text{Énergie d'un photon}} \\ &= \frac{10J}{3,313\times10^{-19}\ \frac{J}{photons}} \\ &= 3,018\times10^{19}\ photons \end{aligned}$$

Exemple 10.1.2

De la lumière rouge ayant une intensité de 15 W/m² et une longueur d'onde de 600 nm arrive sur un capteur ayant une aire de 2 m². Combien de photons sont captés en 5 secondes par ce capteur ?

Pour trouver le nombre de photons en 5 secondes, il faut connaitre la quantité d'énergie captée en 5 secondes et l'énergie d'un photon à cette fréquence. Avec ces données, on trouvera le nombre de photons avec

$$N = \frac{\text{Énergie captée en 5 secondes}}{\text{Énergie d'un photon}}$$

L'énergie reçue par le capteur en 5 secondes est

$$\begin{aligned} E &= IA_{capteur}t \\ &= 15\tfrac{W}{m^2}\cdot 2m^2\cdot 5s \\ &= 150J \end{aligned}$$

L'énergie d'un seul photon est

$$\begin{aligned} E_\gamma &= hf \\ &= \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{6,626\times10^{-34}\ Js\cdot 3\times10^{8}\ \frac{m}{s}}{600\times10^{-9}m} \\ &= 3,313\times10^{-19}\ J \end{aligned}$$

Le nombre de photons reçus est donc

$$\begin{aligned} N &= \frac{\text{Énergie captée en 5 secondes}}{\text{Énergie d'un photon}} \\ &= \frac{150J}{3,313\times10^{-19}\ \frac{J}{photons}} \\ &= 4,53\times10^{20}\ photons \end{aligned}$$

On va faire maintenant un petit raccourci pour calculer l'énergie d'un photon en électronvolts à partir de la longueur d'onde en nanomètres. On calcule l'énergie avec la formule suivante.

$$E_\gamma = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

L'énergie se calcule donc avec la combinaison de constante *hc* qui vaut

$$\begin{aligned} hc &= 6{,}626\ 070\ 15\times10^{-34}\,Js\cdot 2{,}99792458\times10^{8}\,\tfrac{m}{s} \\ &= 1{,}9864\times10^{-25}\,Jm \end{aligned}$$

On pourrait alors changer les joules en électronvolts et les mètres en nanomètres pour arriver à

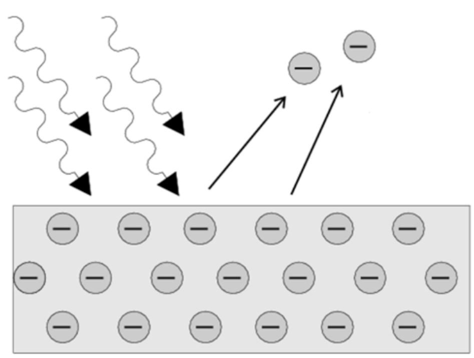
$$\begin{aligned} hc &= 1{,}9864\times10^{25}\,Jm\cdot\frac{10^{9}\,nm}{1m}\cdot\frac{1eV}{1{,}602\times10^{-19}\,J} \\ &= 1239{,}84\,eVnm \end{aligned}$$

On peut donc calculer l'énergie directement en électronvolts à partir de la longueur d'onde en nanomètres avec la formule suivante (on a arrondi un peu…).

Énergie des photons à partir de la longueur d'onde

$$E_\gamma = \frac{1240eVnm}{\lambda}$$

10.2 L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE


cnx.org/content/m39551/1.1/?collection=col11244/latest

Pour appuyer son hypothèse des photons, Einstein l'applique à un phénomène qui semblait défier la théorie ondulatoire : l'effet photoélectrique.

Dans cet effet, de la lumière qui arrive sur un métal provoque l'éjection d'électrons présents dans le métal. Hertz avait découvert l'effet en 1887, mais il fallut attendre 1899 pour que J.J. Thomson comprenne qu'il y avait éjection d'électrons. On peut voir dans ce vidéo que la lumière qui arrive sur la canette éjecte des électrons, ce qui change la charge de la canette et qui fait que les petits bouts de métal attachés à la canette ne se repoussent plus les uns les autres.
http://www.youtube.com/watch?v=WO38qVDGgqw
En théorie, une onde lumineuse peut éjecter des électrons, mais les expériences de Lenard en 1902 avaient mis en évidence des faits troublants.

Il découvrit premièrement que l'énergie cinétique maximale des électrons émis est indépendante de l'intensité de la lumière, donc de l'amplitude de l'onde. Il découvrit aussi que cette énergie maximale augmente si la fréquence de la lumière augmente.

Pour illustrer pourquoi ces résultats étaient troublants, prenons une analogie. Imaginons que des vagues arrivant sur une plage poussent de petits cailloux sur cette plage. Le fait que l'énergie est indépendante de l'amplitude de l'onde voudrait dire que la vitesse avec laquelle les cailloux sont poussés est indépendante de l'amplitude de l'onde. Une vague de 1 cm de haut pousserait les cailloux avec la même vitesse qu'un vague de 20 mètres de haut ! (Si λ est identique pour les deux ondes.) Ce qui influencerait la vitesse des cailloux, c'est la longueur d'onde des vagues. Plus la longueur d'onde est petite, plus les cailloux seraient poussés violemment. Une vague de 1 cm de haut, mais ayant une longueur d'onde de 10 cm, pousserait les cailloux avec plus de force qu'une vague de 20 mètres de haut ayant une longueur d'onde de 30 m. De toute évidence, ces résultats n'avaient pas de bon sens.

Einstein proposa donc l'explication suivante en 1905. Les électrons sont éjectés quand ils absorbent un photon. En absorbant le photon, ils gagnent l'énergie qu'avait le photon, ce qui leur permet d'être éjectés si le photon avait assez d'énergie.

On obtient alors le résultat suivant.

Énergie de l'électron = Énergie du photon - Travail pour sortir du métal

Une fois que l'électron est sorti du métal, son énergie est sous forme d'énergie cinétique. L'énergie du photon est hf et le travail nécessaire pour sortir du métal est une constante qui dépend uniquement du métal. Ce travail s'appelle le *travail d'extraction* ϕ. Par exemple, il faut 4,08 eV pour sortir un électron d'un morceau d'aluminium.

On a alors l'équation suivante.

Effet photoélectrique

$$E_{k\,\max} = hf - \phi$$

Cette formule prévoit que l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés augmente bel et bien avec la fréquence. Elle prévoit aussi que cette énergie est indépendante de l'intensité de l'onde puisque cette intensité ne se retrouve nulle part dans l'équation. Selon Einstein, le nombre d'électrons éjectés augmente si on augmente l'intensité de la lumière (puisqu'il y aura plus de photons pour éjecter des électrons), mais l'énergie de chaque électron reste la même puisqu'un électron n'absorbe qu'un seul photon. Ceci était aussi en accord avec les observations de Lenard en 1902.

On remarque aussi que cette équation prévoit l'existence d'une fréquence seuil. En bas d'une certaine fréquence, les photons n'ont pas assez d'énergie pour éjecter des électrons. S'il faut 4 eV pour sortir un électron du métal et que les photons n'ont que 3 eV, on se doute bien qu'il ne se passera rien. L'éjection se produit si l'énergie des photons est supérieure au travail d'extraction. Cela signifie qu'il y a des électrons éjectés seulement si

$$hf \geq \phi$$

La fréquence seuil, qui est la fréquence minimale, est donc

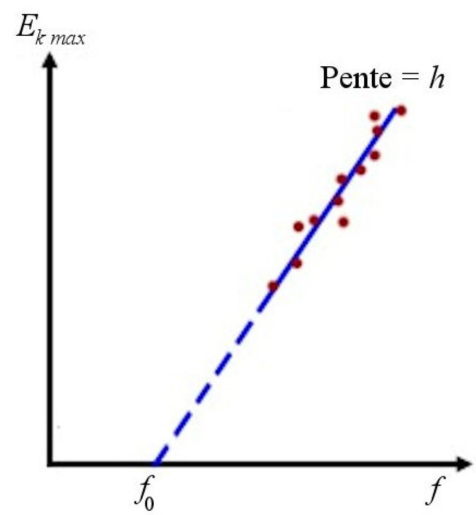
Fréquence seuil pour l'effet photoélectrique

$$f_0 = \frac{\phi}{h}$$

L'explication d'Einstein permet également de comprendre pourquoi on obtient l'énergie cinétique maximum des électrons. L'électron a la valeur de l'énergie cinétique maximale s'il ne se passe rien de plus que l'absorption du photon et la sortie du métal. Il est possible par contre que l'électron perde un peu d'énergie lors d'une collision avec un autre électron ou un noyau atomique.

En 1905, on n'avait pas beaucoup de détails expérimentaux sur l'effet photoélectrique. On savait que l'énergie des électrons augmentait avec la fréquence, mais on ne savait pas comment elle augmentait. Il fallut attendre 1916 pour que Millikan fasse une expérience pour vérifier comment augmente l'énergie des électrons en fonction de la fréquence de la lumière. En fait, Millikan voulait montrer qu'Einstein avait tort et que son idée des photons était ridicule.

Or, quand Millikan fit l'expérience, il obtint un graphique de gauche. C'est exactement ce qu'avait prévu Einstein ! On voit l'éjection des électrons qui commence à une fréquence seuil f_0 et l'énergie cinétique des électrons qui augmente linéairement avec la fréquence par la suite. Selon Einstein, la pente est égale à la constante de Planck et c'est exactement ce que Millikan observa expérimentalement.



www.a-levelphysicstutor.com/quantphys-photo-elect.php

Exemple 10.2.1

De la lumière ayant une longueur d'onde de 310 nm arrive sur du sodium (travail d'extraction = 2,46 eV).

a) Quelle est l'énergie cinétique maximale des électrons éjectés ?

L'énergie cinétique maximale est

$$\begin{aligned}E_{k\max} &= hf-\phi \\ &= \frac{hc}{\lambda}-\phi \\ &= \frac{1240eVnm}{310nm}-2,46eV \\ &= 1,54eV\end{aligned}$$

b) Quelle est la vitesse maximale des électrons éjectés ?

Avec l'énergie cinétique maximale, on trouve la vitesse maximale.

$$E_{k\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

$$2,467\times10^{-19}J = \frac{1}{2}\cdot 9,11\times10^{-31}kg\cdot v_{\max}^2$$

$$v_{\max} = 7,36\times10^5\,\tfrac{m}{s}$$

Vous remarquez surement qu'il fallait mettre l'énergie en joule avant de la mettre dans l'équation. Vous remarquez surement qu'on pouvait prendre $\frac{1}{2}mv^2$ pour l'énergie cinétique, car la vitesse des électrons n'est pas près de celle de la lumière.

c) Quelle est la longueur d'onde seuil de ce métal ?

La longueur d'onde seuil se trouve avec la fréquence seuil.

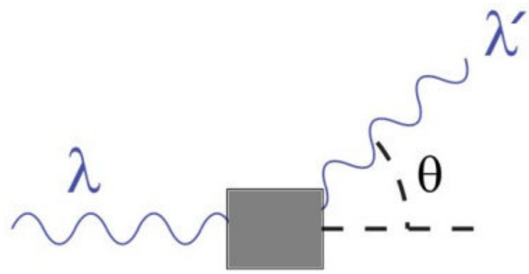
$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \frac{c}{f_0} \\ &= \frac{hc}{\phi} \qquad (\text{car } f_0 = \frac{\phi}{h}) \\ &= \frac{1240eVnm}{2,46eV} \\ &= 504nm\end{aligned}$$

Allait-on voir renaitre la théorie corpusculaire de la lumière ? Le problème, c'est que l'effet photoélectrique était le seul phénomène expliqué par cette théorie. Il n'y avait aucune autre preuve expérimentale de cette théorie alors qu'il y en avait une multitude pour la théorie ondulatoire. Il n'est donc pas étonnant que l'idée des photons n'eût que très peu de partisans avant 1923. Einstein avait lui-même des réserves jusqu'en 1917 environ. Tout changea en 1923 quand on expliqua de l'effet Compton avec les photons.

10.3 L'EFFET COMPTON

On étudiait depuis le début du 20e siècle le passage des rayons X (découverts en 1895) à travers la matière. À la fin des années 10, on savait que les rayons diffusés (déviés de leur trajectoire initiale) avaient une longueur d'onde un peu plus grande que la longueur d'onde des rayons incidents ($\lambda' > \lambda$).

(En réalité, il y a des rayons x diffusés dans toutes les directions en même temps. On ne montre ici que la lumière dans une seule direction.)



en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering

Les expériences ont montré que le changement de longueur d'onde ne dépendait que de l'angle de diffusion selon la formule

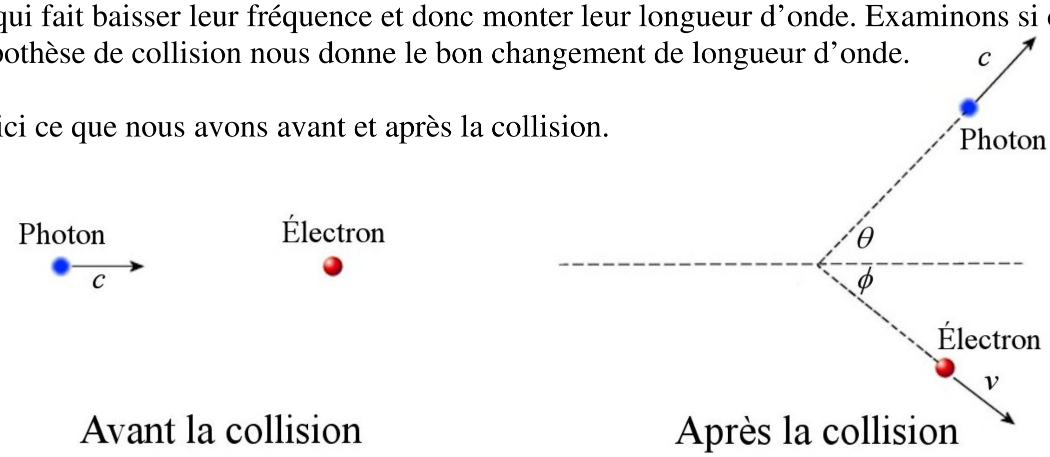
$$\Delta\lambda = 0,0024263nm \cdot (1-\cos\theta)$$

Cette valeur de 0,0024263 nm porte le nom de *longueur d'onde de Compton* et est notée λ_c.

La diffusion elle-même n'est pas mystérieuse. L'onde incidente fait un champ électrique oscillant qui fait osciller les électrons dans la substance. Le rayonnement diffusé vient de ces oscillations puisque les électrons qui oscillent émettent du rayonnement électromagnétique. C'est le changement de longueur d'onde qui était mystérieux. Selon la théorie ondulatoire, l'oscillation des électrons devait se faire à la même fréquence que l'onde initiale et l'onde émise par les électrons devait se faire à la même fréquence que l'oscillation des électrons. L'onde diffusée aurait donc dû avoir la même fréquence, et donc la même longueur d'onde, que l'onde initiale. Ce n'est toutefois pas ce qu'on observait.

En 1923, Arthur Compton découvrit la solution en supposant que la lumière est composée de photons et que les photons incidents entrent en collision parfaitement élastique avec des électrons dans la substance. Cette collision fait perdre une partie de l'énergie aux électrons, ce qui fait baisser leur fréquence et donc monter leur longueur d'onde. Examinons si cette hypothèse de collision nous donne le bon changement de longueur d'onde.

Voici ce que nous avons avant et après la collision.



Dans une telle collision élastique, l'énergie cinétique et la quantité de mouvement sont conservées. Dans ces équations, γ représentera le photon et e l'électron. Les équations sont donc

Équations de conservation pour l'effet Compton

Conservation de l'énergie	$E_\gamma = E'_\gamma + E_{ke}$
Conservation de la quantité de mouvement en x	$p_\gamma = p'_\gamma \cos\theta + p'_e \cos\phi$
Conservation de la quantité de mouvement en y	$0 = p'_\gamma \sin\theta - p'_e \sin\phi$

On va premièrement éliminer ϕ. Pour y arriver, on va isoler $p'_e \cos\phi$ et $p'_e \sin\phi$ dans les équations de la quantité de mouvement.

$$p'_e \cos\phi = p_\gamma - p'_\gamma \cos\theta$$
$$p'_e \sin\phi = p'_\gamma \sin\theta$$

On utilise ensuite $\sin^2\phi + \cos^2\phi = 1$ pour obtenir

$$\left(p'_e \cos\phi\right)^2 + \left(p'_e \sin\phi\right)^2 = \left(p_\gamma - p'_\gamma \cos\theta\right)^2 + \left(p'_\gamma \sin\theta\right)^2$$
$$p'^2_e \cos^2\phi + p'^2_e \sin^2\phi = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma \cos^2\theta + p'^2_\gamma \sin^2\theta$$
$$p'^2_e \left(\cos^2\phi + \sin^2\phi\right) = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma \left(\cos^2\theta + \sin^2\theta\right)$$
$$p'^2_e = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma$$

Cette équation est notre première équation.

Par la suite, on utilise la formule reliant l'énergie relativiste et la quantité de mouvement pour l'électron.

$$E^2 = p'^2_e c^2 + m^2 c^4$$
$$\left(E_k + mc^2\right)^2 = p'^2_e c^2 + m^2 c^4$$

En utilisant la formule de la conservation de l'énergie lors de la collision ($E_k = E_\gamma - E'_\gamma$), cette équation devient

$$\left(E_\gamma - E'_\gamma + mc^2\right)^2 = p'^2_e c^2 + m^2 c^4$$

Comme pour le photon on a $E = pc$, on obtient

$$\left(E_\gamma - E'_\gamma + mc^2\right)^2 = p'^2_e c^2 + m^2 c^4$$
$$\left(p_\gamma c - p'_\gamma c + mc^2\right)^2 = p'^2_e c^2 + m^2 c^4$$
$$\left(p_\gamma - p'_\gamma\right)^2 c^2 + 2mc^3\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) + \cancel{m^2 c^4} = p'^2_e c^2 + \cancel{m^2 c^4}$$

$$\left(p_\gamma - p'_\gamma\right)^2 + 2mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = p'^2_e$$

Cette équation est notre deuxième équation.

On a maintenant 2 équations nous donnant la quantité de mouvement de l'électron après la collision.

$$p'^2_e = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma$$
$$p'^2_e = \left(p_\gamma - p'_\gamma\right)^2 + 2mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right)$$

Les deux côtés droits de ces équations doivent être égaux.

$$\left(p_\gamma - p'_\gamma\right)^2 + 2mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma$$

Ce qui nous donne

$$\begin{gathered}
\left(p_\gamma - p'_\gamma\right)^2 + 2mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma \\
p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma + p'^2_\gamma + 2mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = p^2_\gamma - 2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta + p'^2_\gamma \\
-2p_\gamma p'_\gamma + 2mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = -2p_\gamma p'_\gamma \cos\theta \\
mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = p_\gamma p'_\gamma \left(1 - \cos\theta\right)
\end{gathered}$$

Cette quantité de mouvement du photon est reliée à la longueur d'onde de la lumière par

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

On a donc

$$\begin{gathered}
mc\left(p_\gamma - p'_\gamma\right) = p_\gamma p'_\gamma \left(1 - \cos\theta\right) \\
mc\left(\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'}\right) = \frac{h}{\lambda}\frac{h}{\lambda'}\left(1 - \cos\theta\right) \\
mc\left(\lambda' - \lambda\right) = h\left(1 - \cos\theta\right) \\
\Delta\lambda = \frac{h}{mc}\left(1 - \cos\theta\right)
\end{gathered}$$

Comme

$$\frac{h}{mc} = \frac{6,62607 \times 10^{-34}\,Js}{9,1094 \times 10^{-31}\,kg \cdot 2,99792 \times 10^{8}\,\frac{m}{s}} = 0,0024263nm$$

on a

Effet Compton

$$\Delta\lambda = 0,0024263nm \cdot (1-\cos\theta)$$

On obtient exactement ce qu'on observait expérimentalement ! Une collision entre un photon et un électron explique donc l'effet Compton.

Exemple 10.3.1

Des rayons X, ayant une longueur d'onde de 0,01 nm, entrent en collision avec des électrons.

a) Quelle est la longueur d'onde des rayons X diffusés à 30° ?

Le changement de longueur d'onde est

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= 2,43\times10^{-3}nm \cdot (1-\cos 30°)\\ &= 3,2\times10^{-4}nm\end{aligned}$$

(Remarquez que toutes les ondes électromagnétiques subissent ce changement de longueur d'onde. On peut cependant dire qu'un tel changement ne serait pas facilement observable pour de la lumière visible vu la faiblesse du changement.)

La longueur d'onde des rayons X diffusés à 30° est donc

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = 0,01nm + 0,00032nm = 0,01032nm$$

b) Quelles sont les énergies des photons avant et après la collision pour des rayons X diffusés à 30° ?

L'énergie des photons avant la collision est

$$\begin{aligned}E_\gamma &= \frac{hc}{\lambda}\\ &= \frac{1240eVnm}{0,01nm}\\ &= 124keV\end{aligned}$$

L'énergie des photons après la collision est

$$\begin{aligned}E'_\gamma &= \frac{hc}{\lambda'}\\ &= \frac{1240eVnm}{0,01032nm}\\ &= 120,155keV\end{aligned}$$

On voit que le photon a perdu un peu d'énergie lors de la collision.

c) Quelle est l'énergie cinétique de l'électron après la collision pour des rayons X diffusés à 30° ?

On trouve l'énergie cinétique de l'électron avec la formule de la conservation de l'énergie dans la collision.

$$E_\gamma = E'_\gamma + E_{ke}$$
$$124keV = 120{,}155keV + E_{ke}$$
$$E_{ke} = 3{,}845keV$$

(Ce qui signifie que la vitesse de l'électron est 3,68 x 10^7 m/s.)

En réalité, il y a deux fréquences reçues à l'angle θ parce que les photons peuvent être déviés par un électron ou par le noyau atomique. Comme le changement de fréquence dépend de la masse de ce qui a été frappé par le photon (selon *h*/*mc* dans la formule), le changement de fréquence n'est pas le même. Le noyau étant tellement lourd, il ne reçoit pratiquement pas d'énergie lors de la collision et la fréquence du photon n'est pratiquement pas changée quand il frappe le noyau.

En résumé, les calculs de Compton montraient clairement que la lumière était composée de photons. Une nouvelle preuve s'ajoutait pour supporter l'hypothèse d'Einstein. C'est à partir de ce moment que l'idée des photons fut acceptée par la communauté scientifique.

L'effet photoélectrique et l'effet Compton montrent deux interactions différentes entre un photon et un électron. Le photon peut être absorbé par l'électron, comme dans l'effet photoélectrique, ou il peut simplement faire une collision élastique avec l'électron, comme dans l'effet Compton.

10.4 LA LUMIÈRE EST-ELLE UNE ONDE OU UNE PARTICULE ?

L'effet photoélectrique et l'effet Compton montraient que la lumière agit parfois comme une particule d'énergie *hf*. Pouvait-on réconcilier cette idée avec toutes ces expériences et ces théories faites au 19e siècle et qui montraient que la lumière était une onde ? On peut résumer ainsi la situation en 1923.

Les éléments suivants montrent que la lumière est une onde :

Interférence Diffraction Polarisation
Équations de Maxwell

Les éléments suivants montrent que la lumière est une particule :

Effet photoélectrique Effet Compton

Il y a un sérieux problème puisqu'il est absolument impossible d'expliquer l'interférence, la diffraction et la polarisation avec une théorie corpusculaire et il est absolument impossible d'expliquer l'effet photoélectrique et l'effet Compton avec une théorie ondulatoire.

En 1909, Einstein, alors seul partisan des photons, justifia ses idées en disant que la prochaine phase consistera à trouver un nouveau modèle plus complexe. Avec ce nouveau modèle, on pourrait voir que, dans certaines situations, la lumière semble agir comme une onde et que, dans certaines autres situations, la lumière semble agir comme une particule. On ne trouva toutefois jamais ce modèle qui pourrait combiner ces deux aspects.

En fait, la situation était sur le point de se compliquer encore plus. Ce problème ne se limitait pas uniquement à la lumière…

10.5 LES ONDES DE DE BROGLIE

En 1923, Louis de Broglie (prononcé *de Breuil*) arrive à une conclusion étonnante. La matière peut aussi agir comme une onde ! Il arrive même à la formule donnant la longueur d'onde de ces ondes de matière. Cette formule est

Longueur d'onde de De Broglie

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

où p est la quantité de mouvement de la particule.

Exemple 10.5.1

Quelle est la longueur d'onde d'un électron allant à 3 x 10^6 m/s (1 % de la vitesse de la lumière) ?

Dans ce cas, on peut calculer la quantité de mouvement avec la formule non relativiste. On a donc

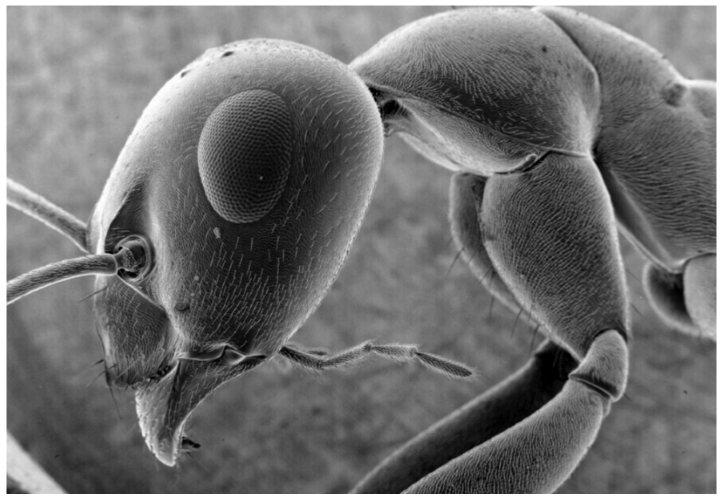
$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{h}{mv} \\ &= \frac{6,626\times 10^{-34} Js}{9,11\times 10^{-31} kg \cdot 3\times 10^{6} \frac{m}{s}} \\ &= 0,243 nm\end{aligned}$$

Les arguments de De Broglie n'étaient pas expérimentaux. Il s'agissait d'une suite d'arguments théoriques concernant la cohérence de la physique. Pour vous donner une idée, voici un des éléments présentés par de Broglie.

> Dans une version plus formelle, les vecteurs à trois composantes n'ont pas leur place en relativité. Souvent, les quantités vectorielles se retrouvent dans ce qu'on appelle des quadrivecteurs qui ont 4 composantes. Par exemple, l'énergie relativiste et la quantité de mouvement sont les quatre composantes du quadrivecteur suivant.
>
> $$\left(\frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z\right)$$
>
> On ne l'a pas vu, mais k est aussi un vecteur (on l'aurait vu si on avait poussé davantage l'étude des ondes en trois dimensions). C'est un vecteur de grandeur $2\pi/\lambda$ dirigé dans le sens de la propagation de l'onde. En relativité, ce vecteur fait partie d'un quadrivecteur dont les 4 composantes sont les suivantes.
>
> $$\left(\frac{\omega}{c}, k_x, k_y, k_z\right)$$
>
> La formule $E=hf$ est une relation entre une des composantes de ces deux quadrivecteurs.
>
> $$E = hf$$
> $$E = \frac{h}{2\pi} 2\pi f$$
> $$E = \hbar\omega$$
> $$\left(\frac{E}{c}\right) = \hbar\left(\frac{\omega}{c}\right)$$
>
> Or, s'il y a une relation entre une des composantes d'un quadrivecteur, la même relation doit être vraie pour les autres composantes. On doit donc avoir
>
> $$p = \hbar k$$
>
> ce qui donne
>
> $$p = \frac{h}{2\pi}\frac{2\pi}{\lambda}$$
> $$\lambda = \frac{h}{p}$$

De Broglie présente sa théorie dans un article en septembre 1923. Les sceptiques sont nombreux au départ, jusqu'à ce qu'Einstein arrive à la même conclusion que de Broglie en janvier 1925 à partir de bases différentes. Erwin Schrödinger montra aussi que la trajectoire d'un projectile pouvait s'expliquer par une réfraction si on considère que le projectile est une onde dont la longueur d'onde est donnée par la formule de De Broglie. Les idées de De Broglie semblaient se confirmer.

L'aspect ondulatoire est utilisé aujourd'hui dans les microscopes électroniques. Dans ces appareils, on utilise des électrons pour faire l'image plutôt que de la lumière. Autrement, le principe est le même qu'un microscope ordinaire. On utilise des champs électriques pour jouer le rôle des lentilles dans ces microscopes. On peut alors obtenir des images très précises, car on utilise des électrons ayant une longueur d'onde inférieure à 1 nm. La résolution d'un microscope étant à peu près égale à la longueur d'onde, on peut voir des détails très petits. Comme les lentilles à électrons ne sont pas parfaites, on obtient une résolution de l'ordre de 5 à 10 nm, ce qui est beaucoup mieux qu'un microscope fonctionnant en lumière visible qui a une résolution d'environ 200 nm. Voici d'ailleurs une image obtenue par un microscope électronique.



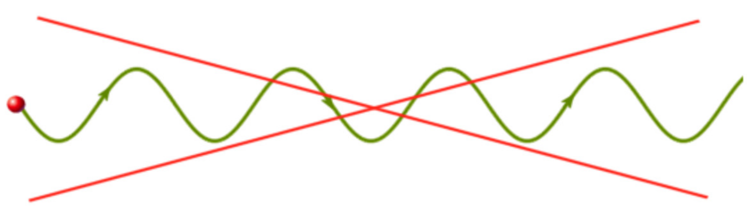
www.boston.com/bigpicture/2008/11/peering_into_the_micro_world.html

Les arguments de de Broglie étaient purement des arguments d'esthétisme et de cohérence. Restait à prouver expérimentalement cette idée. Mais pour bien voir comment on peut prouver cette idée, on doit comprendre ce que signifie *la matière peut agir comme une onde*.

10.6 L'INTERPRÉTATION DE L'ONDE

L'idée que la matière puisse agir comme une onde n'est pas une simple reformulation de ce qu'on a dit à propos des ondes mécaniques qui sont des ondes qui se propagent dans la matière. Dans ces ondes, la matière n'est pas une onde, elle n'est que le support des ondes.

Elle ne signifie pas non plus que les particules se déplacent en suivant une trajectoire qui ondule.

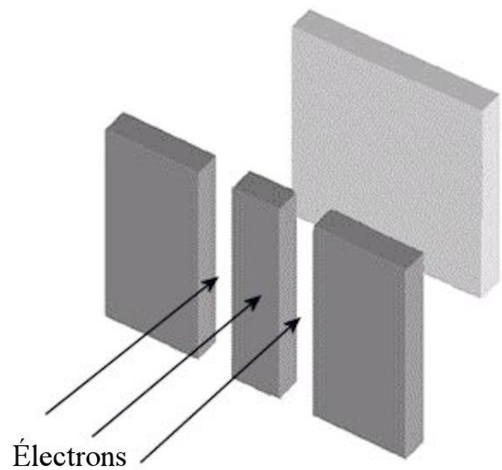


Erreur fréquente : penser que l'électron se déplace en oscillant

L'onde de De Broglie ne représente pas la trajectoire des particules. Les électrons ne se déplacent pas en suivant une trajectoire ondulée dont la longueur d'onde est *h/p*.

L'idée que la matière puisse agir comme une onde signifie plutôt que des particules comme des électrons peuvent, par exemple, faire de la diffraction en passant dans un petit trou. Mais que se passe-t-il alors ? On a vu que, lors d'une diffraction, l'onde s'étale après son passage dans un trou. Est-ce que cela signifie qu'un électron s'étale après son passage dans un petit trou ? Comment une particule peut-elle s'étaler ?

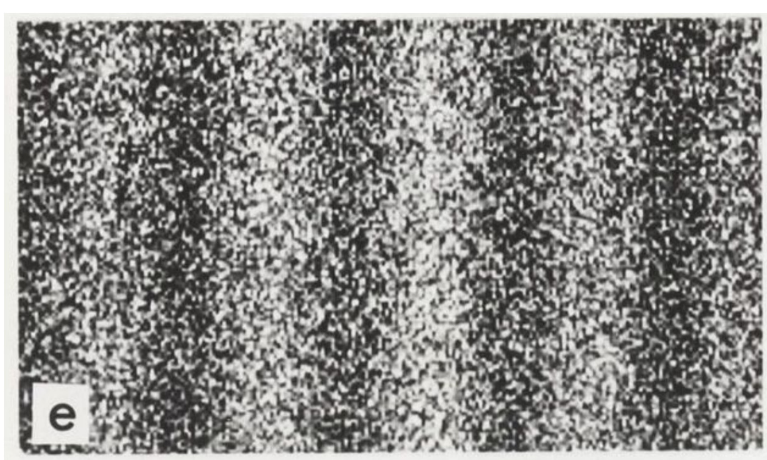
L'interprétation de Copenhague



www.blacklightpower.com/theory-2/theory/double-slit/

Pour bien comprendre ce que représente l'onde, regardons ce qui se passe si on fait l'expérience de Young avec des électrons. Si les électrons agissent comme une onde, on devrait avoir le même résultat que ce qu'on obtient avec des photons : il devrait y avoir une figure d'interférence sur l'écran avec des maximums et des minimums. (Dans cette expérience, l'écran derrière les fentes devient lumineux à l'endroit où l'électron le frappe, ce qui permet d'enregistrer tous les endroits où un électron a frappé l'écran.)

Regardons ce qu'on obtient sur l'écran quand on fait cette expérience (qui fut faite en 1989).



www.hitachi.com/rd/portal/research/em/doubleslit.html

La ressemblance avec la figure d'interférence obtenue avec la lumière dans l'expérience de Young est frappante. De plus, l'espacement entre les franges brillantes est exactement celui qu'on devrait obtenir avec une longueur d'onde donnée par la formule de de Broglie.

Le résultat de cette expérience indique que beaucoup de particules viennent frapper l'écran aux endroits où il y a des maximums d'interférence, donc là où l'amplitude de l'onde est maximale. On remarque aussi que peu de particules viennent frapper l'écran aux endroits où il y a un minimum d'interférence, donc aux endroits où l'amplitude de l'onde est très petite.

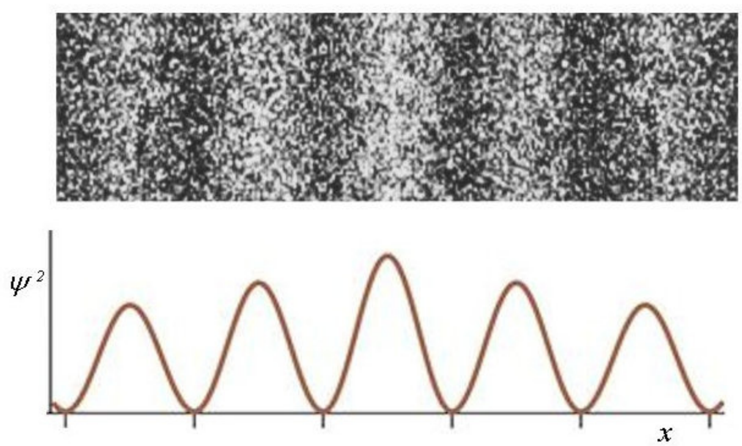
Cela suggère l'interprétation suivante, faite par Max Born en 1926, qui porte le nom d'*interprétation de Copenhague.*

Interprétation de Copenhague

Le carré de l'amplitude de l'onde à un endroit est proportionnel à la probabilité de trouver la particule à cet endroit.

Donc, plus de particules frappent l'écran aux endroits où il y a des maximums d'interférence, car l'amplitude est plus grande à ces endroits et on a donc plus de chance de retrouver les particules à ces endroits.

Le symbole utilisé pour l'amplitude de l'onde est ψ. Ainsi, pour l'expérience de Young avec des électrons, on peut voir sur la figure suivante le lien entre ψ^2 et le nombre d'électrons arrivant sur l'écran.



www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/physics-archive-2011-november-20

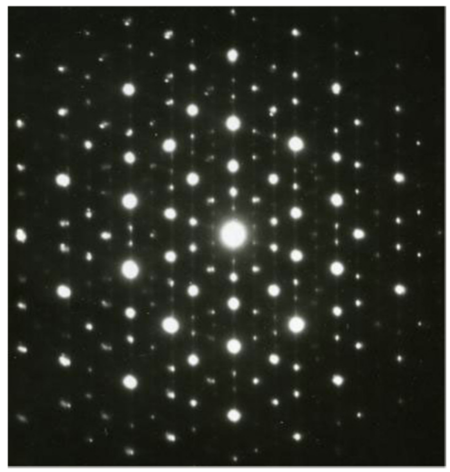
Il est clair que plus ψ^2 est grand, plus il y a d'électrons à cet endroit.

Cette interprétation est valide pour toutes les particules, incluant les photons. Notons qu'Einstein avait suggéré cette interprétation pour les photons en 1905 quand il proposa pour la première fois que la lumière était composée de photons. Il proposa que l'intensité de la lumière sur une surface, qui est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde, devait être proportionnelle au nombre de photons arrivant sur cette surface.

Les premières preuves expérimentales

Il n'était pas possible de faire l'expérience des doubles fentes quand de Broglie publia ses résultats, mais on parvint tout de même à confirmer les idées de De Broglie avec de l'interférence dès 1926.

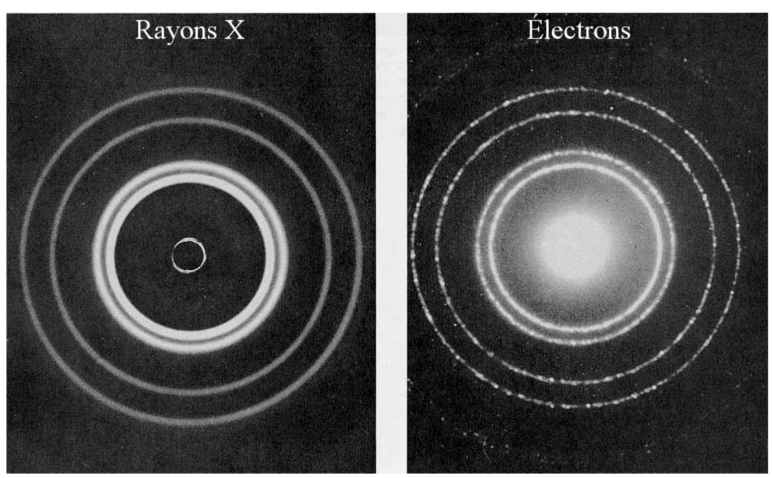
À ce moment, Clinton Davisson et Lester Germer et, indépendamment, George Paget Thomson et Alexander Reid parvinrent à faire de l'interférence avec des électrons. Pour y arriver, Davisson et Germer firent passer des électrons à travers un cristal de nickel. L'espacement régulier des atomes dans le cristal fait que ce dernier agit comme un réseau. Si les électrons agissent comme une onde, on devrait observer la figure d'interférence résultante sur un écran placé derrière le cristal. On pourrait même trouver la longueur d'onde à partir de la distance entre les maximums d'interférence avec $d\sin\theta = m\lambda$. La figure de droite montre ce qu'on obtient sur un écran quand on fait passer des électrons dans un cristal formé de manganèse et d'aluminium.



scienceblogs.com/gregladen/2011/10/05/there-can-be-no-such-creature/

Les taches brillantes sont les endroits où beaucoup d'électrons frappent l'écran, c'est-à-dire les maximums d'interférence. Il y a donc une figure d'interférence, ce qui confirme que les électrons agissent comme des ondes.

Dans cette autre image, on a des rayons X et des électrons de même longueur d'onde qui passe à travers une feuille d'aluminium. Les figures sont circulaires parce que la feuille d'aluminium est constituée de plusieurs petits cristaux orientés au hasard. La similitude des deux images est frappante, ce qui montre bien que les électrons agissent comme une onde (des rayons X dans ce cas).



www.pems.adfa.edu.au/~s9471553/level1/Teaching/Physics1BWaves/Physics1BWaves.html

Les expériences de Davisson et Thomson confirmèrent donc que les électrons peuvent agir comme une onde et que la longueur d'onde était bien donnée par la formule de De Broglie, ce qui valut à tout ce monde un prix Nobel (de Broglie en 1929 et Davisson et Thomson en 1937) (Fait quasi intéressant : Thomson reçut le prix Nobel pour avoir montré que l'électron est une onde alors que son père, J.J. Thomson, l'avait reçu en 1906 pour avoir montré en 1897 que l'électron était une particule !)

On a également réussi à faire de l'interférence avec des neutrons en 1945.

Exemple 10.6.1

Un électron a une énergie cinétique de 350 keV. Quelle est sa longueur d'onde ?

La longueur d'onde se calcule avec

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

Il nous faut donc la quantité de mouvement de l'électron.

Première option : calculer la vitesse

L'énergie de masse de l'électron est

$$\begin{aligned} mc^2 &= 9{,}11\times10^{-31}kg\cdot\left(3\times10^8\tfrac{m}{s}\right)^2 \\ &= 8{,}199\times10^{-14}J \\ &= 511{,}8keV \end{aligned}$$

On trouve la vitesse de l'électron avec

$$\begin{gathered} E_k = (\gamma-1)mc^2 \\ 350keV = (\gamma-1)\cdot 511{,}8keV \\ \gamma = 1{,}6839 \\ \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = 1{,}6839 \\ u = 0{,}8046c \end{gathered}$$

La longueur d'onde est donc

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{\gamma mu} \\ &= \frac{6{,}626\times10^{-34}Js}{1{,}6839\cdot 9{,}11\times10^{-31}kg\cdot 0{,}8046\cdot 3\times10^8\tfrac{m}{s}} \end{aligned}$$

$$= 0,00179 nm$$

Deuxième option : calculer la quantité de mouvement

On peut trouver la quantité de mouvement avec

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$$

$$\left(511,8keV + 350keV\right)^2 - p^2c^2 = \left(511,8keV\right)^2$$

$$pc = 693,4keV$$

$$pc = 1,111 \times 10^{-13} J$$

$$p = 3,703 \times 10^{-22} \tfrac{kgm}{s}$$

La longueur d'onde est alors

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{h}{p} \\ &= \frac{6,626 \times 10^{-34} Js}{3,703 \times 10^{-22} \frac{kgm}{s}} \\ &= 0,00179 nm\end{aligned}$$

Pour obtenir une figure de diffraction en faisant passer des électrons allant à cette vitesse dans un trou, il faudrait qu'ils passent dans un trou vraiment petit.

Dans ce dernier exemple, vous auriez pu être tenté d'utiliser $E = hf$ (où E est l'énergie relativiste) pour trouver la fréquence pour ensuite trouver la longueur d'onde avec $v = \lambda f$. Cette méthode ne serait toutefois pas bonne parce que, selon ce qu'on a appris ici, vous ne pouvez pas utiliser $E = hf$ pour autre chose qu'un photon.

Erreur fréquente : Appliquer $E = hf$ ou $v = \lambda f$ à d'autres particules qu'un photon

La formule $E = hf$ est valide pour toutes les particules, mais il y a quelques subtilités si on l'applique à des particules qui ne vont pas à vitesse de la lumière. Pour des raisons que nous n'exposerons pas ici, (mais qu'on peut voir ici http://physique.merici.ca/ondes/preuve-Ehf.pdf) $\lambda = h/p$ est valide pour toutes les particules (incluant le photon), mais $E = hf$ ne l'est pas si on utilise $v = \lambda f$ pour trouver la fréquence. Comme vous n'avez pas de formule pour trouver f pour la matière dans ces notes, vous ne pouvez pas utiliser $E = hf$ pour autre chose que les photons.

Exemple 10.6.2

Quelle est la longueur d'onde d'une balle de baseball (m = 145 g) allant à 15 m/s ?

La longueur d'onde est

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{h}{mv} \\ &= \frac{6,626\times 10^{-34} Js}{0,145kg\cdot 15\frac{m}{s}} \\ &= 3\times 10^{-34} m\end{aligned}$$

Dans ce cas, il n'y a aucune chance qu'on puisse faire de la diffraction avec la balle de baseball. Il faudra la faire passer par un trou d'un diamètre de 10^{-34} m, ce qui est impossible (le noyau atomique a un diamètre de l'ordre de 10^{-14} m).

Puisque la matière peut agir comme une onde, tout ce qu'on a appris concernant les ondes peut être appliqué à la matière.

Exemple 10.6.3

On fait passer des électrons allant à 5000 m/s dans un trou circulaire ayant un diamètre de 0,1 mm et on observe la figure de diffraction sur un écran situé à 2 m du trou. Quel est le diamètre du maximum central de diffraction ?

Le maximum central se termine au premier minimum. L'angle de ce minimum est donné par

$$\sin\theta = \frac{1,22\lambda}{a}$$

Pour trouver cet angle, il nous faut la longueur d'onde des électrons. Cette longueur d'onde est

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{h}{mv} \\ &= \frac{6,626\times 10^{-34} Js}{9,11\times 10^{-31} kg\cdot 5000\frac{m}{s}} \\ &= 145,5nm\end{aligned}$$

L'angle du premier minimum est donc

$$\sin\theta = \frac{1,22\lambda}{a}$$

$$\sin\theta = \frac{1,22 \cdot 145,5\times 10^{-9} m}{0,1\times 10^{-3} m}$$
$$\sin\theta = 0,001775$$
$$\theta = 0,1017°$$

Sur l'écran, la distance entre le centre du maximum central et la fin du maximum central est

$$\tan\theta = \frac{y}{L}$$
$$\tan\left(0,1017°\right) = \frac{y}{2m}$$
$$y = 3,55mm$$

Le diamètre du maximum central est donc 7,10 mm.

La dualité onde-particule

À la section précédente, on se demandait si la lumière est une onde ou une particule. On voit maintenant que le problème est beaucoup plus étendu puisque la matière aussi a les mêmes propriétés.

La question est donc : *Est-ce que la matière et la lumière sont des ondes ou des particules* ?

Malheureusement, il n'y a pas de réponse simple à cette question. On peut seulement constater qu'elles agissent parfois comme des ondes et parfois comme des particules. Généralement, elles agissent comme des particules quand la longueur d'onde est petite (donc quand l'énergie est grande) et comme des ondes quand la longueur d'onde est grande (donc quand l'énergie est petite.) Pour des objets macroscopiques tels qu'une balle de baseball, cela fait en sorte qu'on ne peut jamais voir le côté ondulatoire de la matière.

Quand la matière agit comme une particule, elle agit seulement comme une particule et pas du tout comme une onde. Par exemple, une collision avec une autre particule est décrite par les équations de collisions entre des particules et cette collision est impossible à décrire avec la théorie ondulatoire, exactement comme cela se produisait avec la lumière pour l'effet Compton. Ce qu'on obtient n'est pas qu'une simple approximation de la théorie ondulatoire pour de grandes longueurs d'onde puisque le résultat est tout simplement impossible à expliquer si on suppose que la matière est une onde. Par contre, quand la matière agit comme une onde, elle agit seulement comme une onde et pas du tout comme une particule. Il est impossible d'expliquer le résultat d'une expérience de diffraction avec des électrons si on suppose que ce sont des particules.

C'est la *dualité onde-particule* : les deux théories sont nécessaires pour expliquer tous phénomènes.

On ne peut jamais voir les deux aspects de cette dualité en même temps. La particule agit comme une particule **ou** comme une onde, jamais les deux à la fois en même temps. C'est ce que dit le principe de complémentarité de Bohr : les aspects corpusculaire et ondulatoire sont complémentaires l'un à l'autre. Ces deux aspects sont nécessaires pour expliquer tous les phénomènes et ils se complémentent, car ils ne sont jamais utilisés en même temps pour expliquer les mêmes phénomènes. Seul l'aspect ondulatoire est présent lors de la diffraction des électrons et seul l'aspect corpusculaire est présent lors d'une collision de particules. On ne peut jamais analyser une situation en parlant à la fois d'onde et de particule. C'est l'un ou l'autre.

Un monde de probabilités

Avec l'interprétation de Copenhague, la physique n'est plus déterministe. Avec une physique déterministe, on pourrait, en théorie, calculer exactement tout ce qui va se passer dans le futur si on savait très précisément la position et la vitesse de tous les atomes dans l'univers. Tout est déterminé d'avance.

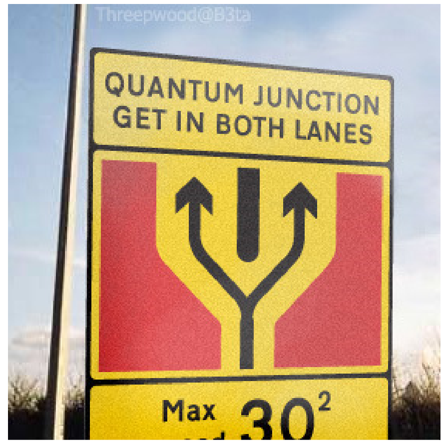
Cette qualité se perd avec l'interprétation de Copenhague. Si on envoie un électron entre deux fentes, l'onde va nous donner les probabilités que l'électron frappe l'écran à différents endroits. On ne saura pas avec certitude où va frapper l'électron, on saura seulement qu'il y a beaucoup de chance qu'il frappe l'écran à certains endroits. Il est donc impossible de prédire exactement ce qui va se passer, on ne peut faire que des probabilités. Einstein s'opposa fortement à ce genre d'idée, et c'est pourquoi il affirma que « *Dieu ne joue pas aux dés avec l'univers* »

L'interprétation de Copenhague va plus loin

On sait que le carré de l'amplitude de la fonction d'onde nous donne la probabilité de trouver la particule à un endroit particulier. En fait, la théorie quantique peut être utilisée pour calculer bien d'autres choses que la position d'une particule. Par exemple, on peut l'utiliser pour prédire le résultat de la mesure du spin d'une particule. Cependant, dans tous les cas, l'interprétation reste la même : la théorie quantique donne uniquement la probabilité d'obtenir une mesure. Prenons un exemple pour illustrer ce concept. Un électron se dirige vers un détecteur qui mesure le spin de la particule. Avec un électron, il n'y a que deux possibilités : le spin vers le haut (+) ou vers le bas (–). Avec la théorie quantique, on peut calculer la probabilité de mesurer + ou – selon la situation. On pourrait obtenir, par exemple, 70 % de chance de mesurer + et 30 % de chance de mesurer –.

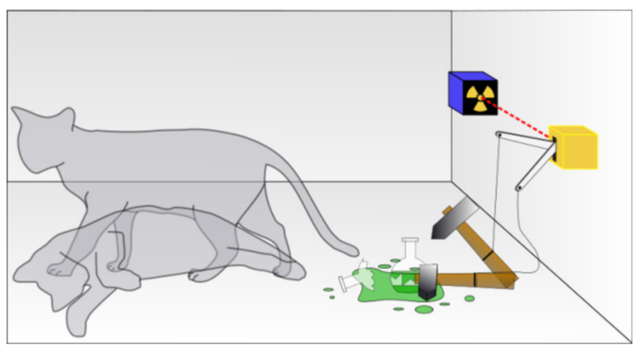
Mais en fait, l'interprétation de Copenhague va encore plus loin que ça. Dans cette interprétation, le spin de la particule n'est pas + ou – avant qu'on la mesure, elle est dans un état ou les deux possibilités coexistent. Dans notre exemple, le spin de la particule est 70 % + et 30 % – ! C'est uniquement au moment où on fait la mesure que l'état de la particule se décide. Ainsi, avant la mesure, la particule était à la fois + et – et après la mesure elle est uniquement + si on a mesuré + ou elle est uniquement – si on a mesuré –. C'est ce qu'on appelle *l'effondrement ou la réduction de la fonction d'onde*.

Réexaminons l'expérience des deux fentes avec cette interprétation. On se rappelle que dans cette expérience, on voit des électrons frapper un écran après avoir traversé 2 fentes. Voir l'électron qui arrive à un endroit spécifique sur l'écran est une mesure de sa position. Avant cette mesure, l'électron était partout en même temps (aux endroits où ψ^2 n'est pas nul). En frappant l'écran, la fonction d'onde s'est effondrée et c'est seulement à ce moment que la position de l'électron se détermine au hasard parmi toutes les possibilités. Comme l'électron était partout en même temps avant la mesure, on considère que l'électron est passé dans les 2 fentes en même temps, comme si, en voiture, on nous demandait d'aller dans les 2 voies en même temps.



www.ipod.org.uk/reality/reality_quantum_intro.asp

Plusieurs, dont Einstein et Schrödinger, n'aimaient pas cette interprétation. Ce dernier inventa en 1935 une petite mise en situation pour illustrer le ridicule de cette situation : le chat de Schrödinger. Un chat est enfermé dans une boite avec un dispositif (du poison) pouvant tuer le chat et qui se déclenche au hasard. Supposons qu'au bout de 2 heures, il y a 60 % de chance que le mécanisme se soit déclenché et que le chat soit mort. Dans ce cas, selon l'interprétation de Copenhague, le chat se trouve dans un état mixte 60 % mort 40 % vivant et ce n'est que quand on va ouvrir la boite pour observer le chat que le sort du pauvre félin va se décider. Après l'observation, le chat deviendra uniquement mort ou vivant.

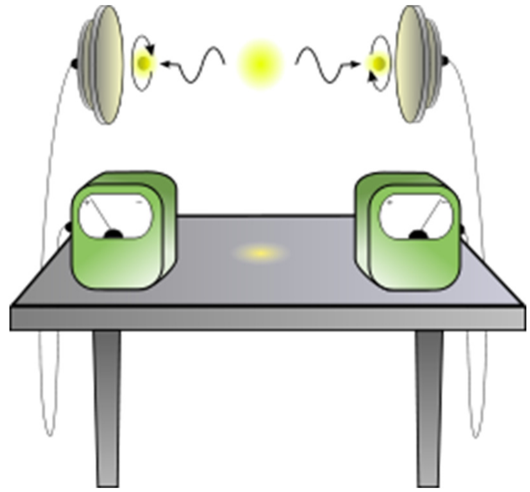


en.wikipedia.org/wiki/Schrödinger's_cat

Pour Einstein et Schrödinger, cette superposition d'états n'avait aucun sens. Pour eux, le chat n'est jamais dans un état superposé mort-vivant. Il est soit mort ou vivant à tout instant dans la boite, même si on ne l'observe pas. Si on ne peut que calculer la probabilité que le chat soit mort ou vivant au bout d'un certain temps, ce n'est que parce qu'on n'a pas suffisamment d'informations. Le fait d'obtenir une probabilité ne représente donc que l'ignorance des observateurs, et non pas une superposition réelle d'états. Pour Einstein et Schrödinger, quand on mesure le spin d'une particule et qu'on obtient +, c'est que le spin était bel et bien + avant la mesure. Si on obtient –, c'est que le spin était – avant la mesure. Le fait qu'on obtienne des probabilités nous indique plutôt qu'il s'agit d'une théorie incomplète. Selon eux, il devrait exister une théorie plus complète qui pourrait faire des prévisions plus précises, une théorie qui nous permettrait de calculer d'avance ce qu'on va mesurer, de connaitre le spin de la particule avant même de la mesurer, plutôt que de nous donner que de simples probabilités.

Le paradoxe EPR

Une autre situation avait été imaginée par Einstein, Podolsky et Rosen (EPR), également en 1935, pour prendre en défaut l'interprétation de Copenhague. Dans cette expérience, une particule dont le spin est nul se désintègre en deux particules se dirigeant dans des directions opposées. Si chacune de ces particules a un spin, les spins des deux particules devraient être opposés selon les lois de conservation de la physique des particules. Cela signifie que si on mesure le spin d'une particule et qu'on obtient +, alors on obtiendra nécessairement – pour l'autre particule.



www.clker.com/clipart-15121.html

Selon l'interprétation de Copenhague, chacune des particules est dans un état superposé moitié +, moitié – avant qu'on mesure le spin. Ce n'est que lorsqu'on fera la mesure d'un des spins qu'il y aura réduction de la fonction d'onde, forçant ainsi l'autre particule à avoir un spin opposé à celui qu'on vient de mesurer. Supposons qu'on a fait cette mesure avec le montage de la page suivante et qu'on a obtenu – avec le détecteur de droite.

On sait alors qu'on obtiendra + avec le détecteur de gauche. Mais alors, comment la particule qui se dirige vers la gauche peut savoir qu'elle doit passer d'un état mixte + et – à un état uniquement + ? La réponse peut sembler simple : la mesure du spin de la particule de droite a provoqué la réduction de la fonction d'onde, faisant passer la particule de gauche d'un état mixte à un état +. Toutefois, cet effondrement ne devrait pas pouvoir se faire instantanément puisque rien ne peut aller plus vite que la lumière selon la relativité d'Einstein. Au mieux, l'effondrement se propage à la vitesse de la lumière.

C'est là que ça se complique. Que se passe-t-il si on mesure le spin de la particule de gauche très peu de temps après la mesure du spin de la particule de droite ? En fait, on peut faire la deuxième mesure tellement peu de temps après la première qu'un faisceau de lumière n'aurait pas le temps de passer d'une particule à l'autre durant ce temps. L'effondrement de la fonction d'onde n'aurait donc pas eu le temps d'atteindre la particule de gauche. Comment alors la deuxième particule, qui était dans un état mixte + et –, peut-elle savoir qu'elle doit donner un spin + alors que l'information n'a même pas le temps de passer d'une particule à l'autre ? Et pourtant, si on fait cette expérience, on obtient toujours + !

En fait, la situation est encore plus bizarre si on prend le point de vue d'un autre observateur selon la relativité. On sait que le temps auquel se produisent les évènements varie selon les observateurs. Ici, il y a même des observateurs qui vont dire que le spin de la particule de gauche a été mesuré avant le spin de la particule de droite. Pour eux, c'est la mesure sur la particule de gauche qui provoque l'effondrement de la fonction d'onde et qui force la particule de droite à avoir un spin –, et ce, avant même que l'information ait eu le temps d'arriver à cette particule !

Pour Einstein, cette mise en situation montrait que l'interprétation de Copenhague ne pouvait être correcte puisqu'elle impliquait un effondrement de la fonction d'onde allant plus vite que la lumière, ce qui entraine toute sorte de paradoxes. Einstein donnait une interprétation différente de cette situation. Dès que les particules sont émises, elles ont chacune une valeur de spin bien déterminé que l'on mesure plus loin. Comme elles ont déjà les spins qu'on va mesurer et qu'il n'y a pas de superposition d'états du tout, il est inutile d'avoir un effondrement de la fonction d'onde. Les spins sont opposés puisque dès leur formation, les particules avaient ces valeurs de spin.

Jusqu'ici, vous êtes surement d'accord avec Einstein.

Les inégalités de Bell

Durant quelques années, il y eut plusieurs confrontations entre Bohr et Einstein au cours desquelles ce dernier arrivait avec différentes mises en situation pour essayer de prendre l'interprétation de Copenhague en défaut. Chaque fois, Bohr parvenait à trouver une façon d'expliquer la situation en utilisant l'interprétation de Copenhague. Par exemple, Bohr affirmait que l'effondrement de la fonction d'onde va effectivement plus vite que la lumière pour le paradoxe EPR, mais que ce n'est pas grave puisqu'aucune information ne pourrait être transmise par ce procédé. La guerre (amicale) entre les deux clans se poursuivit jusqu'à épuisement sans qu'aucun ait pu fournir l'argument décisif en faveur de son interprétation.

La situation changea en 1964 quand John Steward Bell découvrit une façon de déterminer expérimentalement si Bohr ou Einstein avait raison (malheureusement, ils étaient décédés tous les deux). C'est une expérience qui ressemble beaucoup à celle décrite dans le paradoxe EPR, mais la mesure des deux spins se fait selon des axes différents. Bell détermina que les résultats de cette expérience devaient respecter certaines inégalités (les inégalités de Bell) si l'interprétation d'Einstein était correcte alors que ces inégalités ne seraient pas respectées avec l'interprétation de Copenhague. Les détails sont un peu lourds, mais ce qui importe c'est qu'on avait enfin une façon de déterminer expérimentalement qui avait raison. L'expérience fut réalisée pour la première fois au début des années 70 et fut refaite plusieurs fois par la suite avec plus de précision chaque fois. Ces expériences démontrèrent sans l'ombre d'un doute que l'interprétation d'Einstein ne pouvait être correcte. Il semble donc que l'interprétation de Copenhague soit correcte et qu'un objet est bel et bien dans un état mixte avant qu'on effectue les mesures et qu'il y a effondrement de la fonction d'onde lors de la mesure !

Si on se fie à ce qui a été dit concernant le paradoxe EPR, cela signifie que l'effondrement de la fonction d'onde se fait effectivement plus vite que la lumière.

Qu'est-ce qui provoque l'effondrement de la fonction d'onde ?

L'interprétation de Copenhague amène quelques difficultés conceptuelles. Par exemple, que se produit-il s'il y a une mouche avec le chat de Schrödinger dans la boite ? Est-ce que l’observation du chat par la mouche provoque l’effondrement de la fonction d’onde et empêche le chat d’être dans une superposition d’états ? Certains diront que non en affirmant que seuls les êtres conscients peuvent provoquer l’effondrement de la fonction d’onde ! En plus du problème consistant à savoir quels êtres vivants sont conscients, ou même ce qu’est la conscience, cette conception nous amène à nous demander ce qui arriverait si tous les êtres conscients de l’univers disparaissaient. Est-ce que l’univers serait condamné à rester dans une superposition d’états très nombreux ?

Il n’est absolument pas nécessaire que l’observateur soit conscient. En fait, dès qu’il y a interaction avec l’environnement, il y a effondrement de la fonction d’onde. Plus l’interaction est forte, plus l’effondrement se fait rapidement. L’effondrement de la fonction d’onde ne se produit donc pas uniquement lors d’une mesure, elle peut aussi se faire spontanément. On pourrait donc conclure qu’un simple photon enfermé avec le chat dans la boite finirait par provoquer l’effondrement de la fonction d’onde. Et même s’il n’y a pas de photon, les interactions entre les atomes du chat entre eux vont provoquer l’effondrement de la fonction d’onde. Le nombre très important d’atomes dans un chat fait qu’il ne peut pas être dans un état superposé mort-vivant plus de 10^{-23} seconde. Il n’y a donc aucune chance de voir un vrai chat dans une superposition d’états. Si on voulait garder le chat dans un état superposé plus longtemps, il faudrait qu’il soit dans le vide (pour minimiser les interactions avec les atomes entourant le chat) et refroidir le chat pour que sa température soit près du zéro absolu (pour minimiser les interactions entre les atomes du chat). Évidemment, le chat serait alors mort et le poison n’y serait pour rien… Cependant, on peut minimiser les interactions pour des systèmes plus simples et ceux-ci peuvent rester dans un état superposé beaucoup plus longtemps, ce qui permet d’observer expérimentalement les effets des états superposés. C’est ce qui fit, entre autres, l’équipe de Serge Haroche en 1996 (prix Nobel 2012).

La théorie ne parvient quand même pas à déterminer ce qui arrive au système. On sait qu’on ne pourra pas observer le chat dans une superposition d’états, mais on ne sait pas si le chat en sortira mort ou vivant. La théorie ne peut pas prévoir le résultat de cette expérience, elle ne peut que donner les probabilités que chaque possibilité se produise.

L’interprétation des mondes multiples d’Everett

En 1957, une interprétation surprenante fut donnée par Hugh Everett, alors étudiant à Princeton. Elle tente de donner une explication au fait que, parmi tous les résultats possibles d’une mesure, un seul est observé. Que sont devenus les autres états possibles ?

La réponse d’Everett est surprenante : lors de l’observation d’un phénomène, l’univers se sépare en plusieurs univers dans lesquels chaque résultat possible est observé.

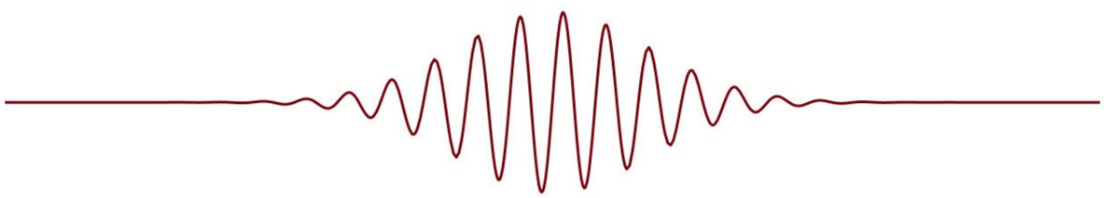
Prenons un exemple pour clarifier cette situation. Supposons que l’on mesure le spin d’une particule et que la théorie nous indique qu’il y a 50 % de probabilité de mesurer + et 50 % de probabilité de mesurer -. Lors de la mesure, l’univers se sépare en deux ; un univers dans lequel on a mesuré + et un autre univers dans lequel on a mesuré -. Dans chacun de ces univers, l'observateur se demande ce qui est advenu de la possibilité disparue lors de la mesure. Dans cette interprétation, les deux possibilités ne sont pas disparues. Elles se sont réalisées toutes les deux, mais dans des univers différents.

On peut alors réinterpréter l'expérience du chat selon Everett. Si on observe un chat dans une superposition d'états mort et vivant, alors l'univers se sépare en deux univers. Dans un univers, le chat est mort et dans l'autre univers, le chat est vivant.

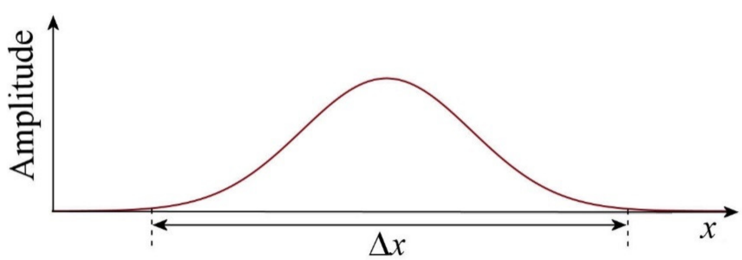
10.7 LE PRINCIPE D'INDÉTERMINATION DE HEISENBERG

Une position indéterminée

Voici de quoi pourrait avoir l'air l'onde d'une particule qui se déplace à une certaine vitesse.

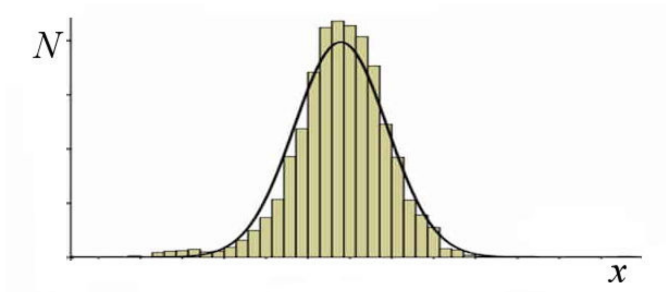


On voit bien que l'amplitude de cette onde varie en fonction de la position.



Comme la probabilité de trouver la particule à un certain endroit dépend de l'amplitude, la particule peut seulement se trouver dans la région de longueur Δx. Si on mesure la position, on va obtenir une valeur de x se situant dans cet intervalle. Il est impossible de déterminer d'avance quelle valeur on va obtenir. On obtiendra une des valeurs possibles sur l'intervalle Δx, mais on ne peut absolument pas prévoir laquelle. On peut seulement savoir qu'il y a plus de chance qu'on mesure une position au centre de l'intervalle puisque l'amplitude est plus grande à cet endroit.

Si on refaisait plusieurs fois la même expérience et qu'on mesurait la position de la particule avec exactement les mêmes conditions et les mêmes appareils très précis, on obtiendrait donc un résultat différent chaque fois. Si on faisait le graphique qui montre le nombre de fois qu'on a obtenu une position située sur un petit intervalle, on obtiendrait un graphique qui pourrait ressembler à ceci.



www.ztable.net/normal-distribution/

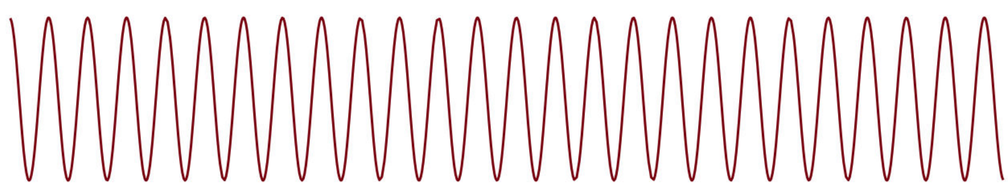
Plus on ferait de mesures, plus le graphique obtenu serait près de la courbe noire qui donne la probabilité théorique.

Comme on ne sait pas exactement où on va trouver la particule pour une mesure spécifique, on parle de *position indéterminée*. Notez qu'une fois que la position est mesurée, on sait exactement où est la particule et sa position n'est plus indéterminée. Cette indétermination fait uniquement référence à une indétermination avant la mesure.

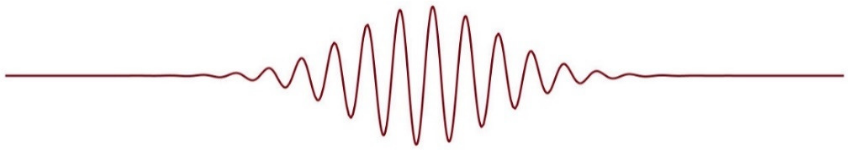
Certains vont parler d'incertitude sur la position plutôt que d'indétermination. On préconise maintenant d'utiliser le terme d'indétermination pour éviter toute confusion avec l'incertitude sur la position qui viendrait d'un appareil de mesure. L'indétermination qu'on a ici ne vient pas d'un appareil de mesure. Même si on avait le meilleur appareil du monde pour mesurer la position, on n'obtiendrait pas toujours la même mesure si on refaisait toujours exactement la même expérience dans les mêmes conditions. Ces variations ne seraient pas causées par l'imprécision de l'appareil de mesure, mais par l'indétermination de la position qui est une conséquence de la nature ondulatoire de la matière.

Une quantité de mouvement indéterminée

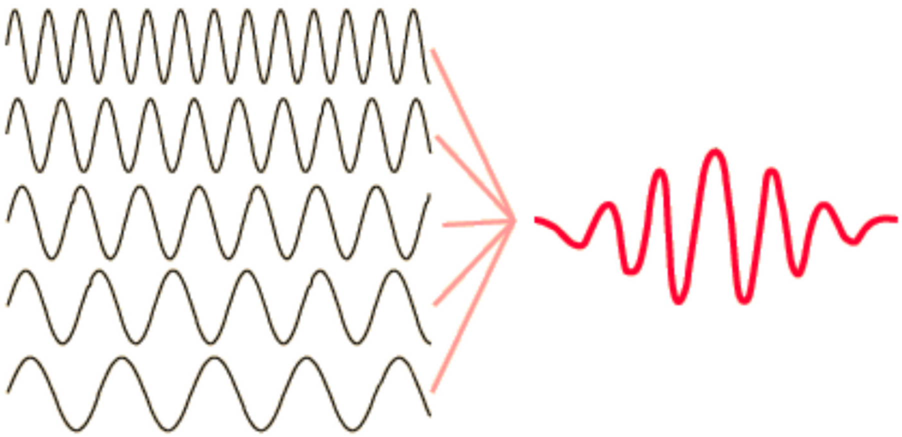
Si une onde a une longueur d'onde très précise, on a alors une onde sinusoïdale avec une amplitude constante.



Or, cette onde s'étend infiniment vers la gauche et vers la droite avec une amplitude constante. Cela signifie qu'on aurait la possibilité de trouver la particule n'importe où dans l'univers. Si on veut que la particule soit localisée à un certain endroit, l'onde doit être comme celle de la figure suivante.

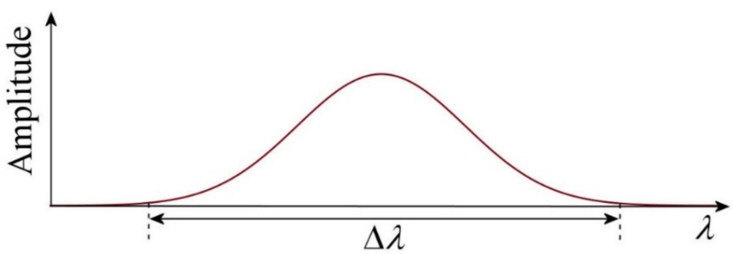


Toutefois, il n'y a qu'une seule façon d'obtenir une onde qui a cette forme. Il faut additionner ensemble plusieurs fonctions sinusoïdales.



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/wpack.html

En fait, il faut additionner une infinité de sinus pour localiser ainsi l'onde. On doit additionner toutes les ondes ayant des longueurs d'onde se situant dans un intervalle de longueurs d'onde $\Delta\lambda$ et dont l'amplitude varie avec la longueur d'onde de la façon indiquée sur le graphique suivant.



L'onde n'a donc pas qu'une seule longueur d'onde. L'onde contient plusieurs longueurs d'onde en même temps. En soi, cela n'est pas très surprenant. Un faisceau de lumière d'une certaine couleur, disons rouge à 650 nm, est en réalité une superposition de plusieurs ondes ayant des longueurs d'onde près de 650 nm.

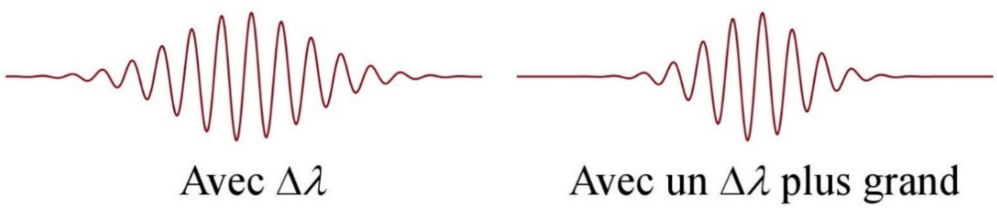
S'il y a plusieurs longueurs d'onde en même temps dans l'onde, alors la particule a plusieurs quantités de mouvement en même temps puisque la longueur d'onde et la quantité de mouvement sont reliées par la formule de De Broglie.

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

Cela veut dire que si on mesure la quantité de mouvement avec un appareil très précis, on tombera sur une des valeurs possibles de quantité de mouvement. Il est impossible de déterminer d'avance quelle valeur on va obtenir. On obtiendra une des valeurs possibles sur l'intervalle Δp, mais on ne peut absolument pas prévoir laquelle. On peut seulement savoir que les valeurs au centre de l'intervalle sont plus probables puisque l'amplitude est plus grande à cet endroit. Encore une fois, il y a une certaine indétermination sur la valeur de p qu'on va mesurer qui vient de la nature ondulatoire de la matière.

Le principe d'indétermination

Il y a un lien entre Δx et Δp. Plus on additionne de longueurs d'onde (donc plus $\Delta\lambda$ sera grand), plus l'onde sera petite (donc plus Δx sera petit).



Des calculs plus poussés (faisant appel à des intégrales de Fourier…) montrent qu'on doit avoir

$$\Delta x \Delta p \approx h$$

(C'est approximativement égal parce qu'il y a différentes façons de définir où exactement commencent et finissent les intervalles Δx et Δp.) Si Δp est grand, Δx est petit. Cela précise en fait ce qu'on a dit précédemment : plus Δp est grand, plus il y a plusieurs quantités de mouvement en même temps, ce qui signifie qu'il y a davantage de longueurs d'onde, ce qui concentre davantage l'onde.

Le produit $\Delta x \Delta p$ est environ égal à h dans le meilleur des cas. En prenant une autre façon de faire varier l'amplitude avec x et λ, la valeur de $\Delta x \Delta p$ est plus grande que h. On a donc la relation suivante, qui est appelée le principe d'indétermination (ou d'incertitude) de Heisenberg.

Principe d'indétermination de Heisenberg (avec p et x)

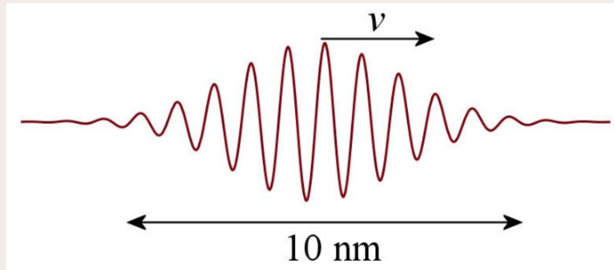
$$\Delta x \Delta p \geq h$$

Ici, on va souvent utiliser $\Delta x \Delta p = h$.

Le principe dit que si on peut prévoir la position avec beaucoup de précision (Δx petit), alors on ne peut plus prévoir la quantité de mouvement avec beaucoup de précision (Δp grand) et que si on peut prévoir la quantité de mouvement avec beaucoup de précision (Δp petit), alors on ne peut plus prévoir la position avec beaucoup de précision (Δx grand). Il est impossible d'avoir un système dans lequel on peut prévoir en même temps la valeur de la position et de la quantité de mouvement qu'on va mesurer avec beaucoup de précision. Plus on peut être précis pour une valeur, moins on peut être précis pour l'autre.

Exemple 10.7.1

Un électron est confiné dans une région de 10 nm de large. Quelle est la valeur de Δp ?



On a

$$\Delta p \Delta x = h$$

$$\Delta p = \frac{h}{\Delta x}$$

$$\Delta p = \frac{6,626 \times 10^{-34} Js}{10 \times 10^{-9} m}$$

$$\Delta p = 6,626 \times 10^{-26} \tfrac{kgm}{s}$$

Cela pourrait vouloir dire, par exemple, que la quantité de mouvement de la particule s'étend sur une plage allant de 10^{-24} kgm/s jusqu'à 1,06626 x 10^{-24} kgm/s (l'écart entre les deux est Δp). Si on mesure la quantité de mouvement d'une telle particule, on tombera sur une des valeurs de p entre ces deux extrêmes. Si on mesure la quantité de mouvement de plusieurs de ces particules, on aura plein de résultats variant entre ces extrêmes, même si les conditions sont exactement les mêmes.

Le principe d'indétermination de Heisenberg n'a pas vraiment d'effets sur les objets macroscopiques. La valeur de h est tellement petite que les Δx et les Δp seraient minuscules dans ce cas. En théorie, on obtiendrait des valeurs un peu différentes de la position si on refaisait plusieurs fois une expérience identique dans laquelle on mesure la position d'une balle de baseball, mais ces variations seraient sans aucun doute des milliards de fois plus petites que l'incertitude de l'appareil qui mesure la position. Les variations dues à la nature ondulatoire de la matière seraient complètement cachées par les variations causées par l'incertitude de l'appareil.

On peut faire un raisonnement à peu près similaire avec l'énergie d'une onde et la durée de vie de l'onde. On obtient alors, dans le meilleur des cas,

$$\Delta E \Delta t \approx h$$

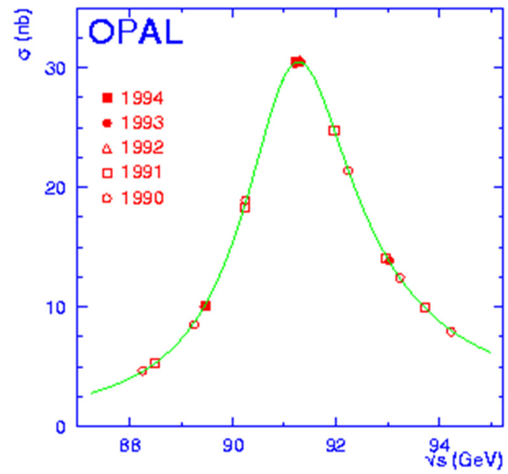
On a donc

Principe d'indétermination de Heisenberg (avec *E* et *t*)

$$\Delta E \Delta t \geq h$$

On peut voir cet effet quand on mesure la masse (donc l'énergie) d'une particule ayant une durée de vie très courte. Voici ce qu'on obtient quand on mesure la masse de plusieurs bosons Z, qui vivent à peine 3×10^{-25} s (ce qui donne une indétermination de 13 GeV pour l'énergie).

On voit très bien l'étalement de la valeur mesurée.



www.etp.physik.uni-muenchen.de/opal/opal_en.html

Il y a quelques subtilités avec le principe d'indétermination d'Heisenberg que vous pouvez découvrir dans ce document.
https://physique.merici.ca/ondes/heisenberg.pdf

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Constante de Planck

$$h = 6,626 \times 10^{-34} Js$$

Énergie émise par un atome en oscillation

$$E = nhf$$

Hypothèse des photons d'Einstein

La lumière est composée de particules (les photons) dont l'énergie est

$$E_\gamma = hf = \frac{1240 eVnm}{\lambda}$$

Effet photoélectrique

$$E_{k\,\max} = hf - \phi$$

Fréquence seuil pour l'effet photoélectrique

$$f_{\min} = \frac{\phi}{h}$$

Effet Compton

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\theta)$$
$$\Delta\lambda = 0{,}0024263nm \cdot (1-\cos\theta)$$

Équations de conservation pour l'effet Compton

Conservation de l'énergie	$E_\gamma = E'_\gamma + E_{ke}$
Conservation de la quantité de mouvement en x	$p_\gamma = p'_\gamma \cos\theta + p'_e \cos\phi$
Conservation de la quantité de mouvement en y	$0 = p'_\gamma \sin\theta - p'_e \sin\phi$

Longueur d'onde de De Broglie

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

Interprétation de Copenhague

Le carré de l'amplitude (ψ^2) à un endroit est proportionnel à la probabilité de trouver la particule à cet endroit.

Principe d'indétermination de Heisenberg (avec *p* et *x*)

$$\Delta x \Delta p \geq h$$

Principe d'indétermination de Heisenberg (avec *E* et *t*)

$$\Delta E \Delta t \geq h$$

EXERCICES

Pour ces exercices, utilisez les valeurs suivantes.

Électron	m_e = 9,1094 x 10^{-31} kg
Proton	m_p = 1,6726 x 10^{-27} kg
Neutron	m_n = 1,6749 x 10^{-27} kg
	1 eV = 1,602 x 10^{-19} J

10.1 Les photons

1. Quelle est l'énergie des photons de la lumière verte ayant une longueur d'onde de 550 nm ?

2. Un laser émet de la lumière rouge ayant une longueur d'onde de 632 nm et a une puissance de 1 mW. Combien de photons par seconde sont émis par le laser ?

3. De la lumière jaune (λ = 585 nm) ayant une intensité de 50 W/m² arrive sur un mur ayant une surface de 3 m². Combien de photons arrivent sur le mur en 20 secondes ?

4. De la lumière bleue (λ = 470 nm) ayant une intensité de 200 W/m² pénètre dans un œil. Combien de photons entrent dans l'œil par seconde si la pupille a un diamètre de 5 mm ?

10.2 L'effet photoélectrique

5. On éclaire du mercure avec de la lumière ultraviolette ayant une longueur d'onde de 150 nm. Quelle est l'énergie maximale des électrons éjectés du métal (en eV) si le travail d'extraction du mercure est de 4,5 eV ?

6. La longueur d'onde seuil du césium est de 686 nm. Quelle est l'énergie maximale des électrons éjectés du métal si on l'éclaire avec une lumière ayant une longueur d'onde de…

   a) 690 nm ?
   b) 450 nm ?

7. Le travail d'extraction d'un métal est de 3,2 eV.

   a) Quelle est la longueur d'onde seuil de ce métal ?
   b) Quelle est la vitesse maximale des électrons éjectés si on l'éclaire avec une lumière ultraviolette ayant une longueur d'onde de 250 nm ?

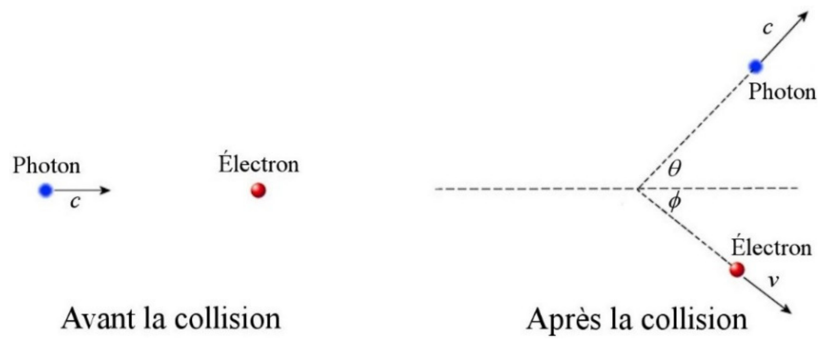
8. Des électrons ayant une vitesse maximale de 500 000 m/s sont éjectés d'un métal quand on l'éclaire avec de la lumière ayant une longueur d'onde de 400 nm. Quelle est la longueur d'onde seuil de ce métal ?

9. De la lumière ayant une longueur d'onde de 450 nm et une intensité de 40 W/m² arrive sur un métal. Combien d'électrons sont éjectés par seconde et par centimètre carré de surface si seulement 3 % des photons qui arrivent sur le métal éjectent un électron ?

10.3 L'effet Compton

10. Des photons ayant chacun une énergie de 62 keV sont diffusés par des électrons.

a) Quel est le changement de longueurs d'onde des photons diffusé à un angle de 45° ?
b) Quelle est la longueur d'onde des photons diffusés à 45° ?
c) Quelle est l'énergie (en keV) des photons diffusés à 45° ?
d) Quelle est l'énergie cinétique des électrons après qu'ils aient provoqué la diffusion des photons avec un angle de 45° ?
e) À quel angle sont projetés les électrons après qu'ils aient provoqué la diffusion des photons avec un angle de 45° (Angle ϕ sur la figure suivante) ?



11. Un photon ayant une énergie initiale de 50 keV est diffusé par effet Compton par des électrons. Après la diffusion, l'énergie du photon est de 49,5 keV. À quel angle ce photon a-t-il été diffusé ?

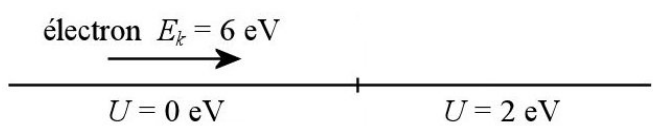
10.5 Les ondes de De Broglie

12. Quelle est la longueur d'onde d'un proton ayant une vitesse de 10^4 m/s ?

13. Quelle est la longueur d'onde d'un proton ayant une vitesse de 2×10^8 m/s ?

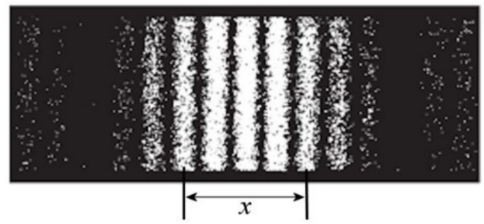
14. Quelle est la longueur d'onde d'un électron si son énergie cinétique est de 10 eV ?

15. Un électron a une énergie cinétique de 6 eV quand il est dans une région où $U = 0$ eV et il se dirige vers un endroit où $U = 2$ eV. De combien changera la longueur d'onde de l'électron quand il passera dans la région où $U = 2$ eV ?



10.6 L'interprétation de l'onde

16. On fait l'expérience de Young en utilisant des électrons ayant une énergie cinétique de 2 eV. Les électrons passent dans des fentes distantes de 0,1 µm et on observe l'arrivée des électrons sur un écran situé à 3 m des fentes et on observe ce qu'on peut voir sur la figure. Quelle est la distance x sur la figure ?



web.utk.edu/~cnattras/Phys250Fall2012/modules/module%202/matter_waves.htm

10.7 Le principe d'indétermination de Heisenberg

17. La quantité de mouvement d'un électron s'étend sur une plage de valeur allant de 2×10^{-23} kgm/s à $2,05 \times 10^{-23}$ kgm/s. Quelle est la valeur de Δx de cet électron ?

18. La durée de vie d'un état excité dans un atome est de 10^{-8} s. Quelle est l'indétermination sur l'énergie (ΔE, en eV) du photon émis lors de la transition entre ce niveau excité et le niveau fondamental ?

RÉPONSES

10.1 Les photons

1. 2,25 eV
2. $3,182 \times 10^{15}$
3. $8,835 \times 10^{21}$
4. $9,291 \times 10^{15}$

10.2 L'effet photoélectrique

5. 3,767 eV
6. a) pas d'électrons éjectés b) 0,948 eV
7. a) 387,5 nm b) $7,868 \times 10^{5}$ m/s
8. 519 nm
9. $2,718 \times 10^{14}$

10.3 L'effet Compton

10. a) 0,0007106 nm b) 0,0207106 nm c) 59,873 keV d) 2127 eV

e) 65,1°

11. 26,3°

10.5 Les ondes de De Broglie

12. 0,0396 nm
13. 1,476 x 10^{-15} m
14. 0,3879 nm
15. 0,1125 nm

10.6 L'interprétation de l'onde

16. 10,41 cm

10.7 Le principe d'indétermination de Heisenberg

17. 1,325 nm
18. 4,136 x 10^{-7} eV