

Introduction à la mécanique quantique

PAR

Pierre Lecoq

Hugo Reveillere

Armand Conty

Antonin Muller

Jinkai Wang

Xuetong Wen

Mathéo Idier

Xavier Noël

Mattéo Gutierrez-Laurence

Loïs Jaffre

Lyam Chardey

Table des matières

1	Découverte de l'électron	4
1	L'expérience de Thomson : calcul du rapport $\frac{q}{m}$	4
2	L'expérience de la goutte d'huile	6
3	Conclusion	7
2	Découverte du noyau atomique	7
1	L'expérience de Rutherford et la découverte du noyau	7
2	Calcul de la taille du noyau par Rutherford	9
3	Découverte du proton	10
4	Découverte du neutron	10
5	Conclusion	12
3	La radioactivité	12
1	Introduction	12
2	Les expériences liées à la radioactivité	12
3	Aspect Théorique	15
4	Les applications pour la radioactivité	18
4	La spectrographie	21
1	Le spectre de la lumière	21
2	Découverte de la spectroscopie	23
5	Série de Balmer et modèle de Bohr	26
1	Série de Balmer	26
2	Modèle de Bohr	26
3	Obtention de la formule de Rydberg avec le modèle de Bohr	27
4	Expérience de Franck et Hertz	28
6	L'effet photoélectrique	30
1	Histoire de l'effet photo-électrique et explication	30
2	Applications de l'effet photo-électrique dans la vie courante.	32
3	L'effet Compton	35

Introduction

L'objectif de ce projet est de découvrir la mécanique quantique. Au cours de ce projet, on a suivi une approche historique pour comprendre les expériences qui sont les fondements des modèles actuels. Cela nous a amené à découvrir les expériences de Thomson, Milikan, Rutherford, Chadwick, Becquerel, Curie, Young, Kirchoff, Franck et Hertz. Nous avons également pu étudier les modèles élaborés grâce à chacune de ces expériences.

Nous avons procédé sous forme de recherches et exposés. De petits groupes de 3 personnes ont été formés pour faire des recherches dans des domaines spécifiques puis les ont présentés au groupe complet. Ensuite venait une phase d'échange permettant d'éclaircir certains points ou d'approfondir les recherches sur certains sujets. La compilation des différents exposés forment ce rapport.

1 Découverte de l'électron

1 L'expérience de Thomson : calcul du rapport $\frac{q}{m}$

1.1 Description

Dans les années 1870 le tube de Crookes est inventé par un savant : William Crookes. Il s'agit d'une enceinte en verre avec deux électrodes à son extrémité. La pression est abaissée (moins de 100 Pascal) dans le tube et lorsque l'on applique un fort potentiel entre les deux électrodes un rayon "Cathodique" est émis. Sir Joseph John Thomson étudie le comportement de ce rayon grâce à une paroi recouverte d'un produit qui s'illumine lorsque le rayon l'atteint. Ainsi il découvre grâce à un condensateur que le rayon porte des charges négatives (le rayon est dévié vers le pôle positif). Il considère le rayon comme constitué de corpuscules de matière et cherche à trouver le rapport $\frac{q}{m}$. Pour cela il conduit une première expérience pour déterminer la vitesse des particules et une deuxième qui servira à calculer le fameux rapport.

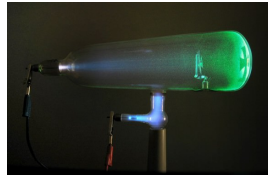


Figure 1.

1.2 Expérience 1 : Détermination de v_0

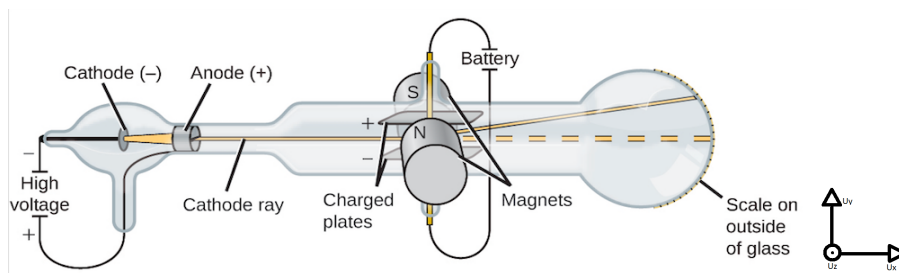


Figure 2.

Le rayon est soumis dans entre les parois du condensateur à un champ électrique $\vec{E} = E\vec{u}_y$ et à un champ magnétiques $\vec{B} = B\vec{u}_z$.

On a à l'entrée du condensateur $\vec{v}_0 = v_0\vec{u}_x$. Soit y_1 la coordonnée selon \vec{u}_y des particules.

Dans cette expérience Thomson règle le champ magnétique et le champ électrique de façon à avoir $y_1 = 0$ (rayon non dévié). Dans le condensateur la seule force qui s'applique aux particules est la force de Lorentz découverte en 1895 : $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$ donc ici $\vec{F} = q(E - vB)\vec{u}_y$ (particules en mouvement rectiligne uniforme selon \vec{u}_x).

Comme le rayon n'est pas dévié on a : $\ddot{x} = \ddot{y} = \ddot{z} = 0$

D'après le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) et après projection sur \vec{u}_y :

$$\ddot{y}m = q(E - v_0 B) = 0$$

$$\Rightarrow v_0 = \frac{E}{B}$$

1.3 Expérience 2 : Détermination de $\frac{q}{m}$

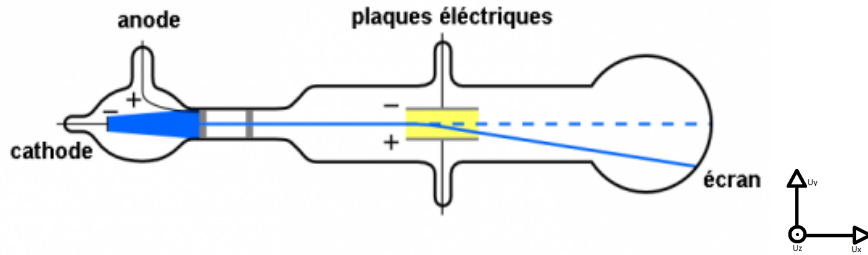


Figure 3.

Pour cette expérience il n'y a plus de champ magnétique. Ainsi le rayon est dévié par le condensateur.

$\vec{F} = qE\vec{u}_y$ et on considère $t=0$ le moment où la particule rentre dans le condensateur.

y_1 la position selon \vec{u}_y de la particule au bout du condensateur. y_2 sa position sur l'écran (c'est la grandeur mesurable).

On applique le PFD à la **particule dans le condensateur** :

$$m\vec{a} = \vec{F}$$

En projetant sur u_y :

$$\Rightarrow \ddot{y} = \frac{q}{m} E$$

C'est une équation différentielle d'ordre 2, on a à $t=0$: $v_y=0$ et $y=0$ donc :

$$y = \frac{q}{m} \frac{E}{2} t^2$$

De plus on a L la longueur du condensateur et d la distance entre le bord extérieur du condensateur et l'écran donc $y_2 = \frac{L+d}{L} y_1$

Soit t_f le temps auquel la particule quitte le condensateur. La vitesse selon \vec{u}_x est constante donc $t_f = \frac{L}{v_0}$.

$$y_1 = \frac{q}{m} \frac{EL^2}{2v_0^2}$$

$$\Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{2v_0^2}{EL(L+d)} y_2$$

C'est grâce à cette équation et au calcul préalable de v_0 que Thomson est parvenu à calculer le rapport $\frac{q}{m}$ pour l'électron.

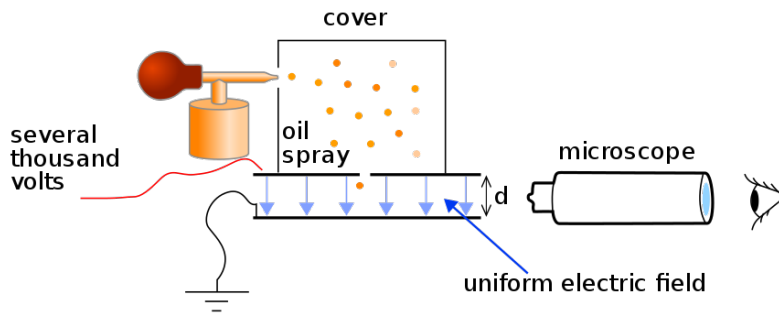
1.4 Conclusions

J. J. Thomson trouve $\frac{|q|}{m} = 1,76 \times 10^{11} C \cdot kg^{-1}$ pour la particule du rayon cathodique ce qui est 2000 fois plus élevé que le rapport $\frac{q}{m}$ de l'ion hydrogène. Thomson considère alors (sans preuve) que c'est parce que la masse de sa particule est beaucoup plus faible alors que la charge a une valeur absolue similaire. Cela lui fait penser que la particule (qui sera nommée plus tard électron) est un composant de l'atome et donc que l'atome n'est pas indivisible.

2 L'expérience de la goutte d'huile

2.1 Montage expérimental

Au début du XXème siècle, Robert Andrews Millikan entreprend de calculer la charge d'un électron. En effet, la connaissance du rapport q/m seul ne permet pas de calculer la charge ou la masse de l'électron. De ce fait, en 1910, il met en place une expérience afin de déterminer cette charge. Pour cela, il utilise une installation comme suit :



Il vaporise de l'huile ionisée à l'aide de radiations dans une enceinte. Les gouttelettes chutent alors jusqu'à arriver entre deux plaques (une chargée positivement, l'autre négativement) qui forment un condensateur. Il y a donc un certain nombre de forces qui s'appliquent sur cette goutte d'huile :

- Le poids $\vec{P} = m\vec{g}$
- La force électrique $\vec{F}_e = q\vec{E}$ avec \vec{E} le champ électrique (les gouttes d'huile ionisées sont attirées par la plaque chargée négativement).
- La force de frottement fluide $\vec{F}_r = -6\pi\eta r\vec{v}$ avec \vec{v} la vitesse de la goutte, r sont rayon et η le coefficient de viscosité de l'air.

2.2 Expériences réalisées

Il effectue deux expériences dans lesquelles il change simplement la polarité du champ électrique (E) mais pas son intensité. Cela modifie donc l'orientation de la force électrique et lorsque celle-ci est dirigée vers le haut, la goutte remonte puisque la force électrique est plus conséquente que le poids.

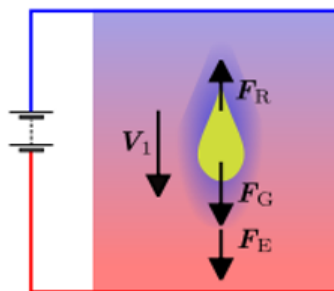


Illustration de la chute d'une goutte d'huile.

Dans le cas de la chute et de la montée, les forces de frottement fluide sont suffisamment importantes ce qui permet à la goutte d'atteindre une vitesse constante très rapidement. On va donc appliquer le Principe Fondamental de la Dynamique dans ces deux cas :

- Chute de la goutte : $\vec{P} + \vec{F}_e + \vec{F}_r = \vec{0}$ (vitesse constante \Rightarrow accélération nulle).

$$\Leftrightarrow m\vec{g} - 6\pi\eta r\vec{v}_1 + q\vec{E} = \vec{0}$$

$$\Leftrightarrow mg + qE = 6\pi\eta rv_1 \quad (1)$$

- Remontée de la goutte : $qE = mg + 6\pi\eta r v_2$ (2)

On a alors deux inconnues q , la charge de la goutte, et r , le rayon d'une goutte.

En calculant (1) - (2) et en utilisant la relation $m = \rho_{\text{huile}} V = \rho_{\text{huile}} \frac{4}{3} \pi r^3$, on obtient :

$$r = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta (v_1 - v_2)}{\rho_{\text{huile}} g}}$$

Maintenant, avec (1)+(2) et en utilisant l'expression de r , on a :

$$q = \frac{9 \pi}{2 E} \sqrt{\frac{\eta^3 (v_1 - v_2)}{\rho_{\text{huile}} g}} (v_1 + v_2)$$

Dans son expérience, R.A. Millikan sélectionne une goutte et il fait varier la polarité du champ pour la faire descendre et remonter d'une certaine distance connue et il chronomètre le temps que cela prend. Il en déduit la vitesse de la goutte. Il calcule ensuite sa charge et il recommence pour un grand nombre de gouttes afin d'avoir la valeur la plus précise possible. Selon le degré d'ionisation de la goutte, il calcule une charge plus ou moins grande. En effet, une goutte d'huile est une structure complexe qui contient beaucoup d'électrons. Cependant, dans cette expérience, elles sont ionisées. Cela signifie qu'elles ont perdu un ou plusieurs électrons, ce qui affecte donc la charge q calculée pour l'ensemble de la structure. Il remarque que cette charge est toujours un multiple entier positif d'une même valeur. Il en déduit donc que la charge élémentaire est $e = 1.6 \times 10^{-19} C$.

Par convention, on aura une valeur de la charge de l'électron $e^- = -1.6 \times 10^{-19} C$.

On notera que l'on a négligé la poussée d'Archimède dans notre expérience pour simplifier.

3 Conclusion

La découverte de l'électron et le calcul de ses propriétés physiques a été une avancée. De façon évidente cela a participé à la compréhension de la structure atomique. Ce n'est qu'au début du 20ème siècle que la découverte du noyau atomique bouleverse à nouveau la perception de la matière par les physiciens.

2 Découverte du noyau atomique

1 L'expérience de Rutherford et la découverte du noyau

L'objectif de cette expérience est d'étudier comment les particules alpha (noyaux d'hélium) sont déviées en traversant une feuille mince.

Pour cela Rutherford a utilisé un tube creux en plomb, fermé d'un côté, contenant un composé du radium. Ce dispositif est une sorte de "canon à particules alpha". La feuille mince utilisée était une feuille d'or (épaisse de $6 \times 10^{-5} cm$) qui était entourée d'un écran circulaire recouvert de sulfure de zinc (ZnS). Le sulfure de Zinc a la particularité de devenir phosphorescent au contact des particules alpha ce qui fait qu'il suffit d'être dans l'obscurité pour observer la déviation des particules.

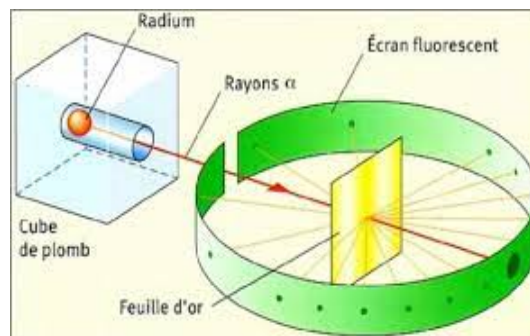


Figure 4.

Observations :

- L'énorme majorité des particules alpha ne sont pas déviées du tout
- Quelques particules déviées à plus de 90° (environ 1 sur 10 000)

Rutherford sera très surpris par ces particules renvoyées et dira même "C'est presque aussi incroyable que si un obus de 38 cm, tiré sur un tissu de papier rebondissait pour venir vous frapper". En effet, les résultats de cette expérience sont en totale contradiction avec le modèle de Thomson en vigueur à l'époque. Le modèle atomique de Thomson est surnommé le "pudding aux prunes". Dans ce modèle, l'atome est une sorte de bouillie chargée positivement dans laquelle se promènent des électrons. Ce modèle de l'atome est donc plutôt homogène et ainsi, les particules alpha devraient le traverser sans être très déviées.

Or, on peut tirer plusieurs conclusions de l'expérience de Rutherford:

- Les particules alpha sont chargées positivement donc l'objet qui les repousse l'est aussi.
- Très peu de particules sont déviées donc l'objet qui les repousse est extrêmement petit.
- Grâce à l'étude des collisions élastiques, on sait que la masse de l'objet est supérieure à la masse des particules alpha.

Toutes ces conclusions conduiront Rutherford à comprendre que le modèle de Thomson est incomplet et il proposera donc son propre modèle atomique "planétaire" en introduisant le terme de noyau en 1912. Dans son modèle, les électrons orbitent autour du noyau central qui est 100 000 fois plus petit que l'atome. Il est le premier à suggérer que la matière est essentiellement constituée de vide.

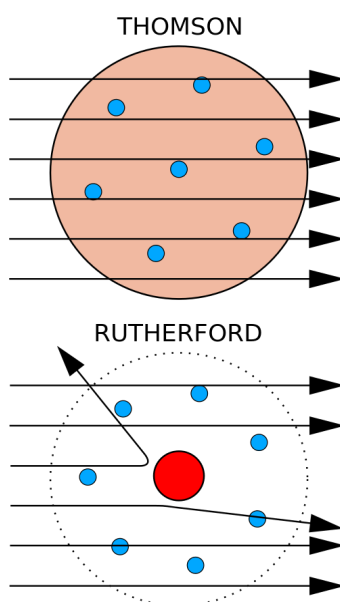


Figure 5.

2 Calcul de la taille du noyau par Rutherford

Étant donné que l'énergie mécanique est constante pour un objet, on peut comparer l'énergie mécanique des particules alpha à la sortie du tube avec l'énergie mécanique lorsque la particule est au plus près possible du noyau. On peut donc seulement majorer la taille du noyau puisqu'on ne peut pas savoir si la particule est déviée avant d'atteindre le noyau. Dans ces calculs on considèrera le noyau et la particule alpha comme des objets ponctuels.

L'énergie mécanique d'un objet est la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle. L'objet en question est la particule alpha dans notre cas. À la sortie du tube, l'énergie potentielle électrique causée par la force de Coulomb entre le noyau et la particule est nulle car la distance entre les deux est trop grande. Au point le plus proche, la vitesse de la particule est nulle car elle s'arrête avant d'être renvoyée dans la direction d'où elle provient.

On a donc $E_c(\text{sortie du tube}) = E_p(\text{point le plus proche du noyau})$

Qu'on notera par la suite $E_c = E_p$

On détermine l'énergie cinétique avec un électromètre et en utilisant la formule $E_c = QV$

Un électromètre est constitué d'une électrode et de deux plaques métalliques.

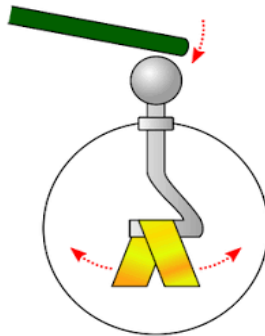


Figure 6.

Lorsque l'électrode est parcourue par une charge électrique, les deux plaques se chargent elles aussi et ainsi se repoussent (Force de Coulomb) puisque leurs charges sont de même signe. En mesurant la distance entre les plaques on peut en déduire Q_{α} . Pour V il suffit de mesurer la tension aux bornes des deux plaques.

E_p est simplement l'énergie potentielle électrique causée par la force de Coulomb entre la particule et le noyau telle que $E_p = \frac{k Q_{\text{noyau}} Q_{\alpha}}{R}$ avec k une constante et R le rayon qu'on cherche à estimer. Q_{noyau} est une approximation basée sur l'hypothèse que, comme la particule alpha, le nombre de charges est égal à la moitié de la masse atomique ce qui donne 99 dans le cas de l'or (En réalité c'est 79). Il utilisera donc $Q_{\text{noyau}} = 99 \times \text{charge élémentaire}$

On obtient donc $R = \frac{k Q_{\text{noyau}} Q_{\alpha}}{Q_{\alpha} V}$.

Ce qui donne un rayon environ égal à $5 \times 10^{-14} \text{ m}$.

Bien que de nombreuses découvertes soient causées par cette expérience, celle-ci a reposé aussi sur beaucoup de coups de chances :

- Les particules alpha sont de faible énergie (5 MeV) \mapsto On peut négliger les effets de diffusions des électrons
- Le noyau est de grande charge nucléaire \mapsto Les particules alpha ne traversent pas la barrière coulombienne nucléaire (environ 10^{-15} m) donc on ne se préoccupe pas de la force nucléaire forte du noyau
- La vitesse des particules (10^7 m/s) est suffisamment faible devant celle de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) \mapsto Pas besoin du formalisme relativiste, la mécanique classique et la quantique donnent les mêmes résultats.

3 Découverte du proton

Pour comprendre la découverte du proton, il faut d'abord remonter à 1886 avec les expériences sur les rayons cathodiques. Cette expérience consiste à placer une anode et une cathode dans un tube rempli de gaz à basse pression. Puisque la différence de potentiel est élevée entre les deux électrodes, cela crée une ionisation du gaz et ainsi des électrons sont accélérés de la cathode vers l'anode. On va donc appeler ce flux "rayons cathodiques". On peut donc comparer ce montage à un accélérateur de particules, avec les électrons comme particules.

En 1886, on remarque qu'il y a également un faisceau lumineux qui est produit dans le sens de l'anode vers la cathode et même au-delà, et que celui-ci était dévié par un champ magnétique, montrant donc que ce rayon était constitué de particules positives. Ne sachant pas à quoi cela correspond, Thompson les appela alors simplement "rayons positifs". Le rapport $\frac{e}{m}$ fut mesuré plus tard et, trouvant un résultat très petit, il fut déduit que la masse de ces charges positives était proche de celle de l'atome.

C'est seulement quand Rutherford proposa son nouveau modèle de l'atome qu'on supposa que ces particules correspondaient à des atomes ionisés. Thompson reprit cette expérience en 1907 avec de l'hydrogène et trouva 2 valeurs de e/m différentes : la plus grande pour l'ion léger H^+ et la deuxième pour la molécule H_2^+ . De plus en plus de choses poussaient à croire en effet que cette particule nucléaire positive était l'atome d'hydrogène sans son électron et ainsi elle fut appelée par beaucoup de scientifiques "particule H".

Rutherford réalisa une nouvelle expérience en 1919 en bombardant différents atomes avec des particules alpha, et il put constater qu'il y avait des particules H parmi les produits de cette réaction nucléaire.

Le protocole de cette expérience est le suivant : Rutherford prit une enceinte à vide contenant une source de particules alpha, en l'occurrence du radium. L'enceinte était fermée par une feuille tout juste suffisante pour arrêter les particules alpha, et un écran fluorescent était placé derrière cette feuille. Il remplit l'enceinte d'azote gazeux, et il remarque alors que l'écran scintillait, indiquant la présence d'un autre rayonnement que le rayonnement alpha, plus pénétrant, et qui apparemment avait la même portée et la même charge que ces fameuses "particules H". Le résultat de cette expérience était le même peu importe le gaz qui était présent dans l'enceinte, et Rutherford en déduit donc que cette mystérieuse particule positive devait être une composante fondamentale de la plupart, voire tous les éléments. C'est l'année suivante que fut formellement posé le nom de "proton" pour parler de cette particule, maintenant considérée comme la base des atomes.

Grâce au rapport $\frac{e}{m}$ trouvé auparavant (1836 fois plus petit que pour l'électron) et à la connaissance du fait que la charge e est la même que pour l'électron au signe près, il a été possible de calculer la masse du proton, égale à $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg environ. Il est d'ailleurs impressionnant de constater que la charge du proton est exactement opposée à celle de l'électron, bien que ces deux entités soient très différentes et complexes.

4 Découverte du neutron

Après la découverte du proton, Rutherford avait également observé que les noyaux des éléments les plus lourds semblaient avoir une masse supérieure à celle attendue si seulement des protons étaient présents. Par exemple, la particule alpha a une charge $+2e$ et un rapport $\frac{e}{m}$ égal à la moitié de celui du noyau d'hydrogène. L'hélium a donc un nombre de masse égal à 4 (masse 4 fois supérieure à celle de l'hydrogène). Cette différence entre le nombre de masse et le numéro atomique se retrouve jusqu'à l'uranium $Z = 92$, mais possédant pourtant un nombre de masse de 238.

Il y a donc une grande quantité de masse inexplicable si on suppose que l'atome est constitué seulement d'électrons et de protons, les scientifiques ont appelé ça la "masse manquante".

En 1920, Rutherford proposa une solution à ce problème en proposant l'existence de "paires", chacune formée par un proton et un électron étroitement liés, qui augmenterait la masse du noyau

sans modifier sa charge. Il appellera déjà cet objet théorique "neutron", mais il lui faut une preuve expérimentale de l'expérience: il va donc s'organiser avec un groupe de ses élèves pour tenter de traquer cet objet aussi mystérieux que neutre. C'est ainsi que James Chadwick va entamer une longue recherche de 12 ans.

En 1930, il découvre qu'en bombardant du Béryllium avec des particules alpha, un rayonnement très énergétique était émis. Les chercheurs ont donc pensé d'abord à un rayonnement gamma, parce que le rayonnement n'était pas dévié par un champ magnétique. Mais contrairement à ces rayons, ils ne produisaient pas d'ionisation et ne déchargeaient pas un électroscope.

Et c'est à partir de ces observations que Irène Curie, et son époux, Frédéric Joliot. Ont eu l'idée de dire que ce rayonnement pourrait être détecté plus efficacement en le faisant bombarder une substance riche en hydrogène. Si par exemple ce rayonnement frappait une feuille de paraffine (qui est un hydrocarbure riche en hydrogène), des protons étaient éjectés, et pouvaient être facilement comptés grâce à un compteur Geiger:

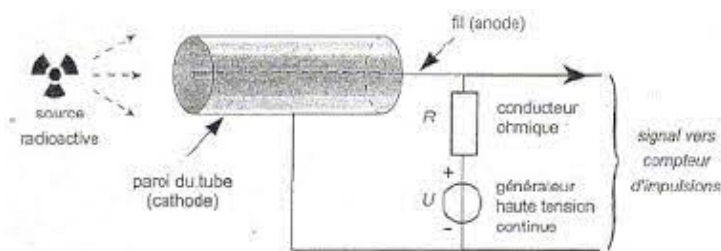


Figure 7.

Ce compteur fonctionne de la manière suivante: C'était simplement un tube métallique contenant un gaz à basse pression, tel que de l'argon. On appliquait une tension d'environ 1kV entre l'anode filiforme centrale et le tube. Le rayonnement ionisant entrant à travers une fente mince de mica et extrayait des électrons de quelques atomes du gaz. Il y a alors création de paires "électrons-ions" le long du trajet de la particule. Les électrons, très mobiles, sont attirés par l'anode centrale et vont à leur tour ioniser encore plus de molécules de gaz (on appelle ça une avalanche de Townsend). Cette avalanche d'électrons sera collectée à l'anode. La décharge résultante crée un signal de courant électrique qui était amplifié et envoyé à un compteur qui émet un "bip" correspondant à la détection d'une particule émise par la source. Mais il faut souligner le fait que ce compteur ne permet pas de déterminer la nature ni l'énergie de la particule qui est détectée.

En 1932, Chadwick émet l'hypothèse que la particule non ionisante capable d'expulser des protons était le fameux neutron tant recherché. Il détermina la vitesse des protons et il put montrer, en utilisant la théorie des collisions, que toutes ces observations ne pouvaient être comprises quantitativement qu'en supposant l'existence d'une particule neutre de la même masse que le proton. Après avoir compris le bombardement du béryllium avec les particules alpha, Chadwick écrit enfin la réaction:



Avec "1n" le fameux neutron, une particule sans charge possédant la masse du proton. Dès l'annonce de cette découverte, Werner Heisenberg proposa l'idée du modèle de l'atome que l'on connaît aujourd'hui, avec le noyau constitué de protons et de neutrons. Pour remarque: hors du noyau, le neutron est instable, et il se désintègre en un électron, un proton et un neutrino. Et ce à un taux tel que la moitié des neutrons présents à un instant donné se désintègrent en environ 10,4 minutes. Ce processus est un exemple de désintégration dite Bêta et il explique comment des électrons peuvent être émis par un noyau, là où ils n'existent normalement pas.

Pour conclure cette découverte, et pour souligner le rapport étroit entre proton et neutron, qui constituent exclusivement le noyau: le neutron et le proton sont appelés nucléons. Et James Chadwick obtiendra un prix Nobel de physique en 1935 pour la découverte du neutron.

5 Conclusion

Le noyau atomique a été découvert très tard, à l'échelle de l'histoire des sciences, car il faut appuyer le fait que les atomes sont les principales entités constitutrices de notre monde: la connaissance de son noyau est ainsi une révolution dans notre compréhension du monde. En effet, une des principales applications théoriques (et pratiques) de ces découvertes réside dans la radioactivité, un phénomène particulier trouvant son origine des interactions dans le noyau atomique.

3 La radioactivité

Données :

masse du proton (mp)	= 1,6726 10 ⁻²⁷ kg
masse du neutron (mn)	= 1,6749 10 ⁻²⁷ kg
masse de l'électron (me)	= 9,1094 10 ⁻³¹ kg
1 Joule	= 6,242 x 10 ¹⁸ eV

1 Introduction

Dans cette synthèse nous parlerons de la radioactivité. Dans un premier temps nous parlerons de la découverte de cette dernière qui permettra par la suite de comprendre énormément de choses à ce sujet. Deux expériences seront présentées : celle de Becquerel et celle de Pierre et Marie Curie. Ensuite, nous aborderons la radioactivité d'un point de vue plus théorique, en parlant de sa définition et de ses différentes formes. Enfin, nous finirons par discuter des applications liées à cette dernière notamment liées à la médecine, l'énergie ou encore l'histoire.

2 Les expériences liées à la radioactivité

2.1 La plaque photographique de Becquerel (1896)

1) Motivation

Henri Becquerel était un physicien français qui a été motivé à explorer la radioactivité en raison de son intérêt pour les propriétés de la matière et de l'énergie. Il a également été influencé par les travaux antérieurs de son père, Antoine Becquerel, qui était également un physicien renommé. En 1896, Becquerel était en train d'étudier les propriétés de la fluorescence des sels d'uranium. Il avait l'intuition qu'il pourrait y avoir un lien entre cette fluorescence et les rayons X, une forme de rayonnement électromagnétique qui venait d'être découvert par Wilhelm Conrad Röntgen.

Afin de tester cette hypothèse, Becquerel a réalisé une expérience dans laquelle il a placé des sels d'uranium sur une plaque photographique protégée de la lumière. Il pensait que la fluorescence de l'uranium serait suffisante pour impressionner la plaque photographique, comme le faisait les rayons X.

Cependant, lorsqu'il a développé la plaque photographique, il a constaté qu'elle avait été impressionnée même dans les zones non exposées à la lumière. Il a réalisé que quelque chose d'autre que la fluorescence devait être responsable de cette impression.

Après des expériences supplémentaires, Becquerel a conclu que l'uranium émettait spontanément un type de rayonnement qu'il a appelé "rayonnement uranique". Cette découverte a conduit à la compréhension de la radioactivité et a ouvert la voie à de nombreuses avancées dans la physique nucléaire.

2) Conception et exécution d'expérience

Au fond d'une boîte en carton opaque, il a placé une plaque photographique. Sur la face sensible de la plaque, une lamelle convexe du sel d'uranium a été posée, ne touchant que quelques points. À côté, une autre lamelle du même sel a été disposée sur la même plaque, séparée de la surface du gélatino-bromure par une mince lame de verre. Cette opération a été exécutée dans une chambre noire, puis la boîte a été refermée et enfermée dans une autre boîte en carton, puis dans un tiroir.

De même, avec le châssis fermé par une plaque d'aluminium, une plaque photographique a été mise à l'intérieur, puis une lamelle du sel d'uranium à l'extérieur. Le tout a été enfermé dans un carton opaque, puis dans un tiroir.

3) Phénomène observé

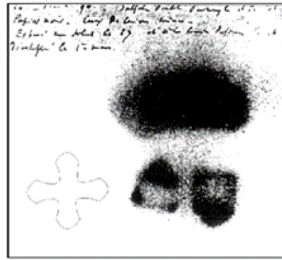


Figure 8.

Après cinq heures, les plaques ont été développées et les silhouettes des lamelles cristallines sont apparues en noir, comme dans les expériences précédentes, comme si elles avaient été rendues phosphorescentes par la lumière. Pour la lamelle posée directement sur la gélatine, il y avait à peine une différence d'action entre les points de contact et les parties de la lamelle qui s'écartaient d'un millimètre environ de la gélatine; la différence pouvait être attribuée à la distance différente des sources de radiations actives. L'action de la lamelle placée sur une lame de verre a été légèrement affaiblie, mais la forme de la lamelle a été très bien reproduite. Enfin, à travers la feuille d'aluminium, l'action a été considérablement plus faible, mais cependant très nette.

4) Conclusion obtenue

Il importe d'observer que ce phénomène ne paraît pas devoir être attribué à des radiations lumineuses émises par la phosphorescence, puisque, au bout de 1/10 de seconde, ces radiations sont devenues si faibles qu'elles n'étaient presque plus perceptibles.

Ce genre de radiation est porté par l'élément Uranium soi-même et sa puissance ne dépend que de la quantité d'Uranium.

De ce fait, Henri Becquerel a découvert que la radiation qu'il a trouvé est une radiation différente du Rayon X, donc il constate que cette radiation est un nouveau rayonnement, mais à l'époque il ne l'a pas donné le nom tout de suite. C'est juste après l'expérience de Marie Curie que cette radiation a obtenu le nom courant :

'La Radioactivité'

2.2 Marie Curie : Découverte du Polonium (1898)

1) Motivation

À l'époque, la radioactivité était un phénomène relativement nouveau et peu compris, et Marie Curie avait déjà fait des recherches sur les propriétés de l'uranium et du thorium. En travaillant avec son mari Pierre, elle cherchait à identifier de nouveaux éléments radioactifs pour mieux comprendre la nature de la radioactivité et ses propriétés. Ils ont commencé à explorer des minéraux contenant de l'uranium et ont découvert que certains d'entre eux étaient plus radioactifs que l'uranium lui-même (ordre de grandeur 400 fois plus fort que l'uranium de même quantité). Donc ils ont réalisé des expériences pour trouver l'élément mystérieux qui porte une radioactivité supérieure.

2) Conception et exécution d'expérience

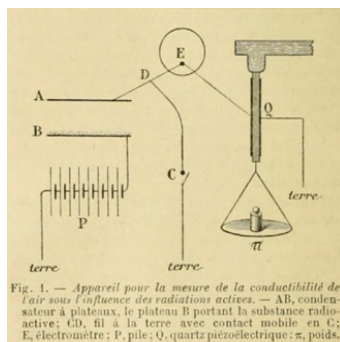


Figure 9.

Tout d'abord, Marie Curie a concassé la pechblende en petits morceaux, puis l'a traitée avec de l'acide chlorhydrique pour la dissoudre. Elle a ensuite évaporé l'acide pour obtenir un résidu sec qui contenait des sels de thorium, de plomb, de cuivre de bismuth, d'arsenic et d'antimoine sachant que les deux derniers n'influencent pas la radioactivité de pechblende.

Pour séparer les éléments uranium et thorium, Marie Curie a mis la pechblende entière dans une solution avec du sulfure d'hydrogène. Étant donné que tous les ions, sauf Ur et Th, réagissent avec les ions soufre pour former des précipités, Marie Curie a filtré les précipités et a réussi à séparer l'Ur et le Th.

Pour isoler le plomb, elle a ensuite filtré la solution et a ajouté de l'acide sulfurique pour précipiter le plomb sous forme de sulfate de plomb. De plus, après avoir filtré les sels de plomb précipités, elle a mis la solution dans de l'eau ammoniacuée. L'ammoniac réagit avec les ions bismuth pour former des précipités, mais l'hydroxyde de cuivre formé par la réaction avec les ions cuivre est soluble dans l'ammoniac. Les éléments inconnus se sont-ils précipités ensemble cette fois ? Marie Curie a testé l'intensité radioactive du précipité et a constaté que l'intensité radioactive du précipité était 1,500 fois plus forte que celle de l'uranium pur de même masse, elle a donc conclu que l'élément inconnu et l'hydroxyde de bismuth avaient précipité ensemble cette fois.

Pour éliminer le **bismuth**, une méthode de sublimation a été employée :

1. Après avoir précipité le bismuth sous forme de nitrate de bismuth, Marie Curie a ensuite dissous le nitrate de bismuth dans de l'eau distillée pour obtenir une solution claire.

Elle a ensuite ajouté de l'ammoniaque à la solution pour faire précipiter le bismuth sous forme d'hydroxyde de bismuth.

2. L'hydroxyde de bismuth a ensuite été filtré et séché pour obtenir un solide blanc.

3. Ce solide a ensuite été chauffé à haute température pour le faire sublimer, c'est-à-dire le transformer directement de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par l'état liquide intermédiaire.

4. Le gaz de bismuth sublimé (à 1050K) a ensuite été recueilli sur une plaque froide pour le faire condenser et former des cristaux purs de bismuth.

5. Cependant, lorsque la température est tombée à 600K, un liquide inconnu a commencé à apparaître éparpillé sur la paroi interne du récipient. Puisqu'aucun autre élément n'apparaît à cette température, Marie Curie a conclu que ces gouttelettes de liquide étaient des éléments inconnus.

3) Phénomène observé

Ensuite, Marie Curie a détecté dans cette nouvelle substance une puissance de radioactivité avec une ordre de grandeur 4 ,000 fois plus grand que l'uranium de même qualité.

4) Conclusion obtenue

Par conséquent, Marie Curie a constaté qu'il existait certains éléments qu'elle ne connaissait pas encore à l'époque. Marie Curie appelle alors ce nouvel élément : le POLONIUM.

Nous avons donc pu découvrir les différentes expériences qui ont transcendé plus d'un scientifique durant le 20ème siècle. Maintenant, nous nous devons d'expliquer plus théoriquement ce phénomène qu'est la radioactivité, c'est l'objet de cette prochaine partie. En effet, après la découverte de ce phénomène, de plus en plus d'éléments furent catégorisés dans différents groupes de radioactivité que nous énumérerons plus bas. Il est d'ailleurs très intéressant de remarquer que les précédentes expériences ont permis ensuite de catégoriser les atomes théoriquement, mais ce qu'il faut comprendre c'est que dans ce domaine c'est peu souvent le cas, en effet on découvre plus souvent les choses théoriquement puis on prouve ensuite leur existence par l'expérience.

3 Aspect Théorique

Définition

La radioactivité est un phénomène physique concernant les atomes instables, c'est-à-dire les atomes possédant un déséquilibre important entre le nombre de proton et de neutron, il y a donc un déséquilibre qui rend l'atome instable. Ces atomes se transforment spontanément en d'autres atomes en émettant simultanément des rayonnements. Par exemple le Carbone 12, qui est composé de 6 neutrons et 6 protons, est totalement stable tandis que le Carbone 14, lui, est instable car il y a un déséquilibre entre le nombre de proton et de neutron (6 protons et 8 neutrons). Le ^{14}C et le ^{12}C sont tous deux des isotopes du carbone. Deux atomes sont isotopes l'un par rapport à l'autre s'il possède le même nombre de protons mais un nombre différent de neutron comme c'est le cas pour les deux carbone ci-dessus. Voici le diagramme de Segré montrant la zone de stabilité des atomes en fonction de leur nombre de proton (Z) et leur nombre de neutron (N) :

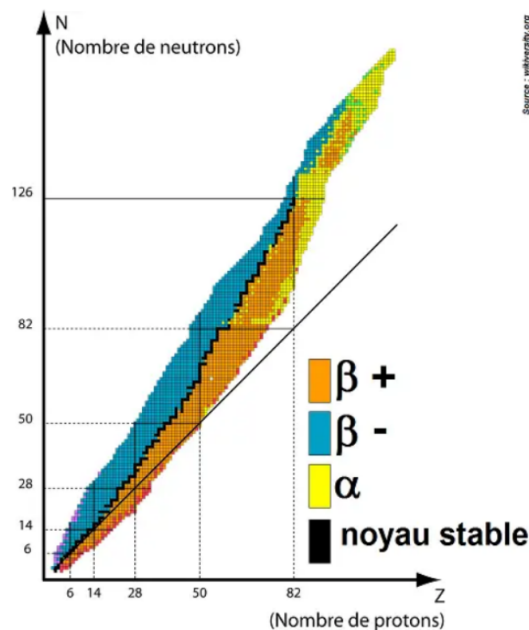


Figure 10.

On remarque en noir ce que l'on appelle la vallée de la stabilité. Elle ne suit plus la courbe $Z=N$ à partir d'un certain Z , car la trop forte concentration de proton déséquilibre le noyau, il doit alors se "diluer", ce pourquoi il y a un peu plus de neutron que de proton pour les noyaux stables (à partir de $Z=20$ environ). Cependant, quand ce nombre de neutron est trop grand le noyau préfère expulser des nucléons, c'est la désintégration alpha, que l'on verra par la suite. Certains noyaux vont même avoir besoin de plus de 50% de neutron en plus.

Mais pourquoi un déséquilibre du noyau le rend-il instable ?

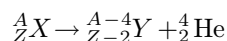
En réalité, tout est question de répulsion et d'attractivité. Au sein du noyaux les protons devraient se repousser car ils sont tous de charge positive, or d'autres interactions entrent en jeu : l'interaction forte et faible. Comme son nom l'indique l'interaction faible est négligeable par rapport à l'interaction forte ou du moins son rayon d'action est plus faible (de l'ordre de 10^{-18}m , ce qui correspond à un centième de nucléon). En effet, elle est cent mille fois moins intense. De plus, il n'existe aucune théorie de comment marche l'interaction faible seule tout comme l'interaction forte. L'interaction forte possède quant à elle un rayon d'action de l'ordre du noyau (environ 10^{-15}m) mais elle n'est qu'intense qu'entre deux nucléons (paires de nucléons). Cette Force est responsable de la stabilité du noyau et est d'une très grande intensité. Cette interaction, dont on ne connaît pas grand chose, l'emporte sur la force de répulsion électrostatique: Or quand un déséquilibre trop important entre le Z et N apparaît l'interaction forte n'est plus assez efficace face à la force électrostatique alors le noyau se désintègre. Si le nombre de protons est trop grand par rapport au nombre de neutron alors il n'y aura pas assez de neutron pour "diluer" la répulsion des protons entre eux.

Les types de rayonnement

Il existe 3 principaux type de rayonnement (autrement appelé désintégration quand la transformation est irréversible) : α , β et γ .

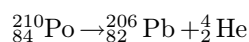
- Radioactivité α

Cette radioactivité correspond à l'émission d'une particule alpha qui est un noyau d'Hélium (2 neutrons et 2 protons). Cette désintégration peut se noter :



On remarque, que l'atome Y est différent de l'atome X car il n'ont pas le même Z. De plus, le noyau en question possède toujours la même différence entre le nombre de neutron et de proton, en effet cette désintégration est dû au fait que le noyau n'était pas instable à cause du déséquilibre mais à cause de sa masse trop importante (encombrement du noyau). Il a donc libéré deux protons et deux neutrons pour perdre de la masse. Sur le diagramme de stabilité on remarque que les désintégrations alpha sont plus ou moins localisées dans l'alignement de la vallée de la stabilité mais trop haut pour en faire partie. Le noyau effectue donc cette désintégration pour se rallier à cette vallée en suivant la direction de la courbe Z=N. Cette désintégration concerne généralement les atomes ayant un $A > 200$ ou $Z > 82$. Par exemple, un atome de polonium 210 (84 protons et 126 neutrons) devient, par radioactivité alpha, un atome de plomb 206 (82 protons et 124 neutrons).

Exemple :



- Radioactivité β

Cette désintégration peut être séparé en deux groupes : β^+ , β^-

Pour expliquer ce phénomène il faut revenir à l'interaction forte. Nous avons appris qu'un neutron possédait une charge nulle mais cela n'implique pas qu'il ne possède pas de charge. En effet, tout comme le proton il possède des quarks (ce sont des charges partielles, ils sont au nombre de trois dans les nucléons).

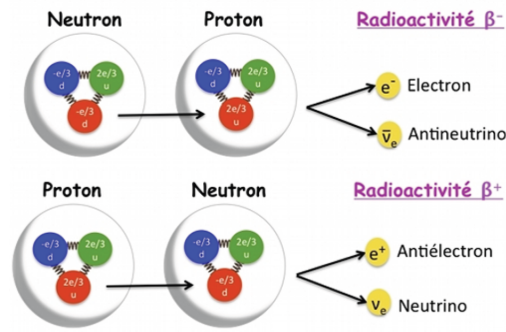
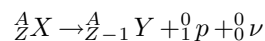


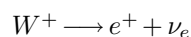
Figure 11.

Les quarks sont soit up soit down (up pour positif et down pour négatif). C'est l'élément qui donne les charges aux nucléons. L'interaction forte est la force qui maintient les quarks en place tout comme les neutrons et protons dans le noyau. En effet, l'interaction forte est de plus en plus intense selon la distance. A la manière d'un élastique, si on essaye de séparer un quark dans un nucléon plus on le sépare plus la force qui le retient est grande. Ce sont les gluons qui sont responsables de cette interaction forte, en effet, les quarks s'échangent des gluons continuellement (les gluons sont des bosons, petite particule). Les quarks ont une propriété étonnante qui est qu'il se transforme de up en down et inversement à l'aide d'un boson W, ce changement de charge est dû à l'interaction faible. Cette désintégration bêta est la transformation d'un proton en un neutron, c'est la désintégration β^+ , et d'un neutron à un proton, c'est la désintégration β^- . Pour la désintégration β^+ se transforme en un quark down, et émet un Boson W^+ qui est une particule de la famille des bosons (particule subatomique ayant des caractéristiques plutôt inconnues). Après cette transformation, le boson W^+ se désintègre en un positon et un neutrino (élément neutre et de masse quasi nulle) et pour la désintégration β^- , un quark down se transforme en un quark up, et émet un Boson W^- , après cette transformation, le boson W^- se désintègre en un électron et un anti-neutrino (antiparticule du neutrino). Les bosons W ont une durée de vie d'environ 3×10^{-25} s et une masse équivalente à 81 fois celle du proton.

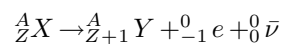
La réaction β^+ se note :



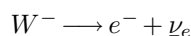
Et la relation intermédiaire se note :



Et la réaction β^- se note :



et sa réaction intermédiaire :

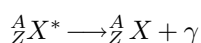


Il est important de noter que comme les bosons W sont plus massifs que les électrons et les protons, il y a un défaut de masse dans les équations précédentes, cette différence est dégagée sous forme d'énergie. Mais pourquoi un neutron se transforme en proton et inversement ? En fait, cette transformation sert à retrouver la stabilité de l'atome en réduisant son nombre de proton et en augmentant son nombre de neutrons et inversement. Sur le diagramme de Segré on remarque que suite à la désintégration bêta l'atome suit une droite appelée isobare (c'est une droite perpendiculaire à la droite $Z=N$ qui a pour coefficient directeur -1) pour se stabiliser.

- Radioactivité γ

Cette désintégration est particulièrement différente des autres, en effet elle n'intervient jamais seule. Elle est toujours précédée d'une désintégration alpha (peu souvent) ou d'une désintégration bêta. Elle intervient quand un atome est excité suite à une désintégration. Sa particularité est qu'elle ne change pas le nombre de nucléons, ce pourquoi elle n'apparaît pas sur le diagramme de Segré. Elle sert à libérer un trop plein d'énergie. En réalité, les noyaux possèdent eux aussi des paliers d'énergie et doivent libérer de l'énergie (deux entités (électron et noyau) ne peuvent pas être sur le même niveau d'énergie or les niveaux d'énergie d'un électron sont différents de ceux du noyau) pour redevenir stables. Pour cela elle libère tout simplement une particule Gamma appelée Photon (particule de masse et de charge nulle mais étant vecteur d'énergie).

La réaction se note :



Avec X^* le noyau excité et γ le photon.

Grandeurs et unités :

Les principales grandeurs et unités liées à la radioactivité sont au nombre de trois : le Becquerel, le Sievert et le Gray. Le Becquerel sert à mesurer le nombre de désintégration de noyau par unité de temps aussi appelé l'activité, le Gray correspond à la quantité d'énergie transférée par unité de masse de la matière exposée (le noyau) et le Sievert sert à évaluer le risque d'effets biologiques, le danger auquel nous sommes exposés (la dose efficace).

On pourrait faire une analogie avec un pommier. Le nombre de pommes qui tombent se compare à aux becquerel, le nombre de pommes arrivant sur une personne situé en dessous, le Gray et les marques laissées sur son corps les Sievert.

Nous avons donc discuté de l'aspect expérimental puis théorique, parlons maintenant de l'aspect pratique. En effet, la radioactivité est très présente dans les domaines de l'énergie, la médecine ou même la science de la datation. En effet elles font intervenir les différents types de radioactivité énoncés ci dessus mais elles font aussi intervenir une radioactivité plus forcée comme la fission par exemple. C'est ce dont nous parlerons dans cette dernière partie.

4 Les applications pour la radioactivité

4.1 Centrales nucléaires

Il existe deux types de production d'électricité dans les centrales nucléaires : la fission nucléaire et la fusion nucléaire.

1) La fission nucléaire:

La fission nucléaire est une forme de réaction nucléaire dans laquelle un noyau atomique lourd (principalement de l'uranium ou du plutonium) se divise en deux ou plusieurs atomes de masse inférieure sous l'impact d'un neutron. Le neutron n'ayant pas de charge électrique, donc il peut facilement s'approcher de noyau et pénétrer à l'intérieur sans être repoussé.

La fission s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie et en même temps, de la libération de deux ou trois neutrons. Les neutrons libérés peuvent à leur tour casser d'autres noyaux, c'est une réaction en chaîne.

Dans le cas des bombes nucléaires, la réaction en chaîne est une explosion incontrôlée, la fission de chaque noyau entraînant la fission de plusieurs autres noyaux. Dans un réacteur nucléaire, la vitesse de la réaction est contrôlée par l'insertion de barres de contrôle de manière à ce que, en moyenne, la fission de chaque noyau déclenche la fission d'exactly un autre noyau. Les neutrons à haute énergie libérés par la fission nucléaire se déplacent à des vitesses si élevées (neutrons rapides) qu'ils doivent être ralentis pour augmenter leurs chances de toucher des atomes et de déclencher d'autres fissions nucléaires. La plupart des réacteurs nucléaires commerciaux utilisent des modérateurs (barres de cadmium, graphite et eau lourde plus coûteuse) pour ralentir les neutrons de haute énergie en neutrons thermiques de faible énergie.

La fission de tous les noyaux d'un kilogramme d'U-235 produirait 20 000 mégawattheures d'énergie, soit autant que l'énergie libérée par la combustion d'au moins 2 000 tonnes de charbon, ce qui équivaut à faire fonctionner une centrale électrique de 20 mégawatts pendant 1 000 heures. Après le dégagement d'une grande quantité de chaleur issue de la fission nucléaire, sous haute pression, l'eau de refroidissement évacue la chaleur pour former de la vapeur. La vapeur à haute température et à haute pression entraîne la turbine, qui à son tour entraîne la rotation du générateur. Cela génère une grande quantité d'électricité. La fission nucléaire est un type à part entière de radioactivité qui ne fait pas partie des autres familles citées dans le chapitre précédent.

2) La fusion nucléaire:

La fusion nucléaire est une forme de réaction nucléaire dans laquelle des noyaux de faible masse, principalement du deutérium ou du tritium, dans certaines conditions (par exemple des températures et des pressions très élevées), fusionnent entre eux pour produire de nouveaux noyaux plus lourds, ce qui s'accompagne d'un énorme dégagement d'énergie.

Les réactions thermonucléaires sont à la base de l'explosion des bombes à hydrogène et peuvent générer de grandes quantités d'énergie thermique en un instant, mais elles ne peuvent pas encore être exploitées. Des réactions thermonucléaires contrôlées peuvent être obtenues si elles peuvent être générées et exécutées de manière contrôlée, dans une certaine zone restreinte et selon les intentions de chacun.

La fusion froide est un scénario conceptuel pour la fusion thermonucléaire (réactions thermonucléaires à l'intérieur des étoiles), dont on sait qu'elle existe dans la nature, et qui réduirait considérablement les exigences en matière de réaction, ce qui permettrait de générer des réactions de fusion froide contrôlées à l'aide d'un équipement plus courant et plus simple. Tout en rendant les réactions de fusion plus sûres.

Il existe trois méthodes habituelles pour produire la fusion nucléaire.

1. le confinement par champ de gravité
2. le confinement inertiel
3. le confinement magnétique.

Parmi les principales méthodes de fusion contrôlée : le confinement par laser (confinement inertiel) et la fusion par confinement magnétique (tokamak). Un tokamak est constitué d'une chambre à vide circulaire centrale dont l'extérieur est entouré de bobines. Lorsqu'il est mis sous tension, l'intérieur du tokamak génère un énorme champ magnétique en spirale qui chauffe le plasma qu'il contient à des températures très élevées en vue de la fusion nucléaire.

4.2 Le carbone 14

Le C-14 peut être utilisé pour déterminer l'année en raison de sa radioactivité. Tant que l'organisme est vivant, il continue d'attirer le C-14, mais lorsqu'il meurt, il cesse de l'attirer. Comme le C-14 est radioactif (il se désintègre en N), le nombre de C-14 dans un organisme mort diminue de plus en plus avec le temps. La demi-vie (taux de désintégration) du C-14 étant de 5730 ans, il est possible de déduire l'âge de l'organisme en mesurant le nombre de C-14 présents et en calculant le nombre de demi-vies qui se sont écoulées.

La limite de la méthode du C-14 est toutefois l'importance de l'erreur. Si tout le C-14 a été émis, il est impossible de le mesurer. La limite supérieure de cette durée est de 43 500 ans. Entre 20 000 et 12 000 ans, l'erreur est de l'ordre de 70 à 150 ans, et si l'on arrive à moins de 6 000 ans, l'erreur est de l'ordre de 30 à 40 ans. Cela nous montre l'extrême précision de cette méthode.

4.3 Les rayons X

Les rayons X sont une onde électromagnétique de très haute fréquence, de très courte longueur d'onde et de haute énergie.

Comment les rayons X sont produits :

En frappant une cible métallique à l'anode avec des électrons accélérés, une partie des électrons rapides est rayonnée par l'action du noyau, convertissant une partie de leur énergie cinétique en énergie de rayons X. Une fraction des électrons rapides pénètre dans la partie interne de l'atome cible, provoquant le délogement de ses atomes internes et le remplissage de l'espace vacant par les atomes externes qui sautent. Une partie des électrons rapides pénètre dans la partie interne de l'atome cible, provoquant le délogement de ses atomes internes et le remplissage de l'espace vide par les atomes externes qui sautent, générant des photons dans le processus de saut et produisant ainsi des rayonnements.

Propriétés physiques des rayons X :

1. Effet pénétrant. En raison de leur courte longueur d'onde et de leur énergie élevée, les rayons X ne sont que partiellement absorbés par la matière lorsqu'ils l'éclairent, et la plupart d'entre eux traversent les lacunes atomiques, ce qui leur confère une forte capacité de pénétration. La pénétration est liée à l'énergie des photons de rayons X et à la densité du matériau.
2. L'ionisation. Lorsqu'une substance est irradiée par des rayons X, l'ionisation des électrons à l'extérieur du noyau peut être provoquée par la libération d'électrons de leurs orbitales atomiques. Sous l'effet de l'ionisation, les gaz peuvent conduire l'électricité ; certaines substances peuvent subir des réactions chimiques et des effets biologiques.
3. Les rayons X peuvent provoquer la fluorescence de certains composés tels que le phosphore et le cyanure de baryum et de platine lorsqu'ils sont irradiés. Cet effet peut être utilisé comme fluoroscopie lors de l'observation de l'image des rayons X à travers les tissus humains.
4. Effets thermiques. La majeure partie de l'énergie des rayons X absorbée par une substance est convertie en chaleur, ce qui augmente la température de l'objet.

Propriétés biologiques des rayons X :

Lorsqu'ils sont irradiés dans un organisme vivant, les rayons X peuvent inhiber et détruire des cellules biologiques, ce qui entraîne des changements physiologiques plus ou moins importants dans l'organisme. Les rayons X peuvent donc être utilisés pour traiter des maladies, en particulier des tumeurs. Cependant, le processus de traitement peut également produire d'autres effets secondaires nocifs pour l'organisme.

Pour conclure, on peut dire que la radioactivité fût une découverte immensément importante pour le monde scientifique qui a découlé sur énormément d'applications dans des domaines divers et qui nous a permis de mieux comprendre le monde qui nous entoure et même de faciliter la découverte d'autres phénomènes comme les constituants de l'atome découvert en partie grâce au rayonnement alpha du radium découvert par les scientifiques durant le 20^{ème} siècle.

Après avoir exploré le fascinant domaine de la radioactivité, nous plongeons maintenant dans une autre facette captivante de la mécanique quantique : la spectrographie. Alors que la radioactivité nous a révélé les subtilités du noyau atomique et les processus de désintégration spontanée, la

spectrographie nous permet d'explorer les signatures lumineuses des atomes et des molécules. En nous basant sur les principes de l'interaction lumière-matière, nous allons étudier comment les spectres obtenus nous dévoilent les propriétés quantiques et les structures internes des substances. Cette transition nous invite à élargir notre compréhension des phénomènes quantiques en passant d'une échelle microscopique, avec la radioactivité, à une échelle macroscopique, en observant les caractéristiques lumineuses qui nous entourent grâce à la spectrographie.

4 La spectrographie

1 Le spectre de la lumière

1.1 Découverte du spectre visible

En 1666, Isaac Newton étudiait la perception des couleurs par l'oeil humain. Il était convenu à cette époque que la lumière formait un tout, cependant, Newton en doutait fortement et a décidé de reprendre une expérience déjà bien connue : le passage d'un rayon lumineux à travers un prisme.

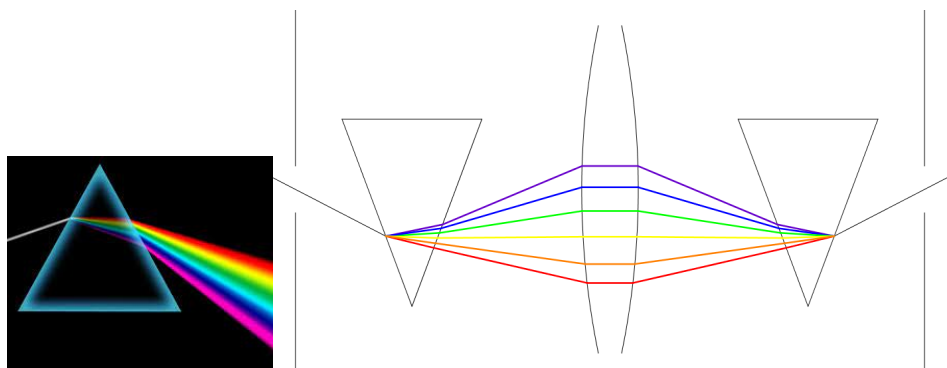


Figure 12.

On expliquait ce phénomène par l'existence de couleurs invisibles du prisme, révélées par le passage de la lumière. Newton pensait plutôt que ces couleurs ne pouvaient provenir que de la lumière. Si tel est le cas, une opération inverse de recombinaison devrait être possible. Newton eut alors l'idée de focaliser les rayons colorés dans un second prisme à l'aide d'une lentille convergente et pu alors observer un unique rayon blanc en sortir : Newton a démontré que la lumière était un mélange de couleurs qu'il était possible de décomposer et recomposer grâce à des prismes.

1.2 Infra-rouges et Ultra-violets

Les infra-rouges ont été découverts par accident par l'astronome William Herschel. En 1800 alors qu'il étudiait le spectre solaire, il réalisa une expérience pour mesurer la température de ses différentes couleurs. Il plaça sur ce spectre quelques thermomètres et constata que la température augmentait en direction du rouge. C'est en essayant de trouver la limite qu'il observa que la température continuait de monter au delà du rouge, et il en avait déduit l'existence de rayons lumineux invisibles qu'il avait appelés "rayons radiatifs".

L'année suivante, le physicien Johann Ritter étudiait l'impact des couleurs du spectre lumineux sur l'oxydation du chlorure d'argent (AgCl). Il décomposa grâce à un prisme un rayon solaire et déposa le long du spectre obtenu des feuilles imbibées de AgCl . L'oxydation était visible par l'apparition de tâches brunes sur les feuilles. Ritter pu alors observer que la vitesse de l'oxydation du sel d'argent était plus rapide vers le violet, mais également au delà, prouvant l'existence de rayonnements qu'il appella "rayons oxydant", aujourd'hui appelés rayons ultra-violets.

1.3 Interférences de Young

En 1801, Thoams Young s'intéressait à l'optique et avait repris les travaux de Newton, et sa théorie corpusculaire de la lumière. Il fit passer par deux fines fentes, un rayon coloré, isolé du spectre, et plaça un écran plus loin.

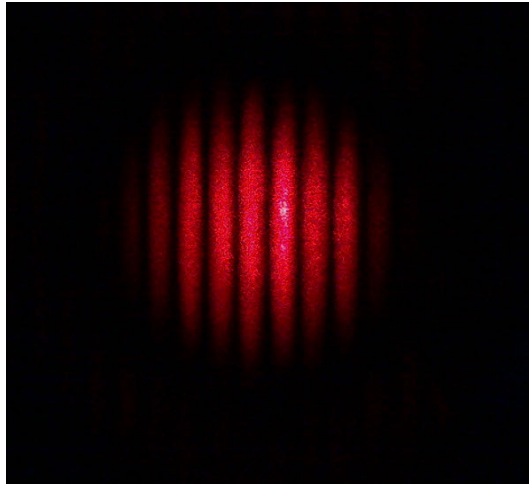


Figure 13.

Ce que Young pu alors observer sur l'écran était une succession de franges brillantes, toutes séparées par des franges plus sombres. Ce phénomène d'interférence traduit directement la nature ondulatoire de la lumière, puisque ces franges ne peuvent apparaître que lorsque les ondes incidentes sont en phase.

Du fait que la lumière soit une onde, Young déduit que pour chaque rayon du spectre de la lumière il existe une longueur d'onde qui lui est propre. Avec une approche géométrique, il est possible de les mesurer.

Dans le schéma ci-dessous, notons a la distance entre les deux fentes S_1 et S_2 et D celle entre les fentes et l'écran. On pose N et P les projetés orthogonaux des deux fentes sur l'écran. Soit O , le milieu du segment $[NP]$, origine de l'axe y confondu avec l'écran. On choisit un point M sur l'écran tel qu'il soit positionné sur une frange brillante, et on note y sa coordonnée sur l'écran.

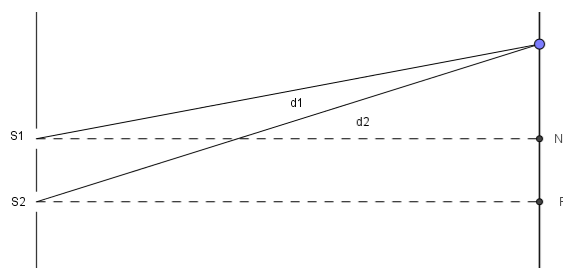


Figure 14.

Avec le théorème de Pythagore, on peut calculer les distances d_1^2 et d_2^2 .

$$d_1^2 = S_1M^2 + NM^2 = D^2 + (OM - ON)^2 = D^2 + \left(y - \frac{a}{2}\right)^2$$

Et de même, $d_2^2 = D^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2$.

On définit la différence de marche δ pour tout M sur l'écran : $\delta(M) = d_2 - d_1$.

En pratique, la distance entre les fentes et l'écran est assez grande et la position du point M est assez proche de l'origine. On a donc l'hypothèse $d_1 + d_2 \approx 2D$. Ainsi, on a

$$\delta(M) = d_2 - d_1 = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_2 + d_1} = \frac{D^2 + (y + \frac{a}{2})^2 - D^2 - (y - \frac{a}{2})^2}{2D} = \frac{y^2 + ya + \frac{a^2}{4} - y^2 + ya - \frac{a^2}{4}}{2D} = \frac{2ya}{2D}$$

Finalement

$$\delta(M) = \frac{ay}{D}$$

Or, on a placé M sur une frange brillante, donc les deux ondes incidentes sont en phase, et donc $\delta(M)$ est un multiple entier de la longueur d'onde λ du rayon. C'est à dire.

$$\exists m \in \mathbb{Z}^* : \delta(M) = m\lambda \Leftrightarrow \lambda = \frac{ay}{mD}$$

En mesurant la valeur de y pour la première frange brillante (soit pour $m = 1$) il est alors possible de calculer une valeur approchée de λ . En effet, la résolution spectrale de ce montage n'est pas suffisante pour obtenir un résultat précis. On a donc besoin d'un nouveau montage pour faire ces mesures.

En 1814, l'opticien Fraunhofer réalise un montage expérimental en s'inspirant des fentes de Young. Ce montage est une généralisation des fentes de Young, ce qui permet d'obtenir une meilleure résolution spectrale pour faire des mesures plus précises. Il s'agit d'une généralisation du montage de Young avec N fentes. Plus le nombre de fentes est important, plus la précision du spectre le sera. La largeur de la frange est alors divisée par N ou $N - 1$ si N est respectivement impair ou pair, ce qui l'affine et permet des mesures plus précises.

Fraunhofer avait utilisé ce montage pour analyser les couleurs du spectre solaire et a pu observer des discontinuités dans le spectre obtenu. C'est en 1859 et 1862 que des rapprochements seront fait avec la série de Balmer et le spectre d'émission de l'hydrogène (lors d'une transition d'un état de niveau supérieur à 2, vers l'état de niveau 2). Les raies de ce spectre correspondent à des raies particulières du spectre solaire réalisé par Fraunhofer : les raies C, F, f et h. Ces correspondances permettent de déduire la présence d'hydrogène dans notre soleil.

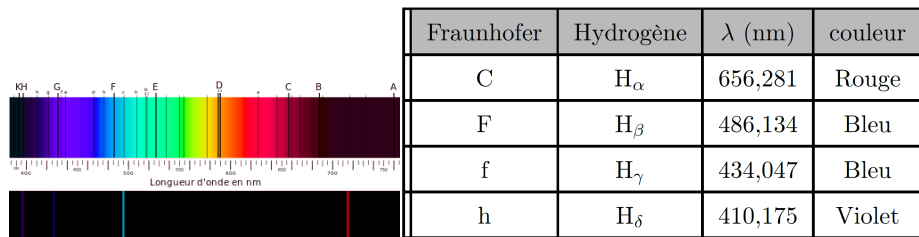


Figure 15.

2 Découverte de la spectroscopie

2.1 Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, Thomas Young a réussi à mesurer la longueur d'onde pour le rouge et le violet. Il a également remarqué que plus la longueur d'onde est élevée, moins le rayon est dévié. Cette découverte est très importante pour la suite.

Les années 1860 marquent une nouvelle évolution dans le domaine. Gustav Robert Kirchoff propose de disperser la lumière générée par un gaz pour en observer le spectre. Il réalise donc les trois expériences suivantes qui mèneront aux trois lois de la spectroscopie.

2.2 Première expérience de Kirchoff

Dans un premier temps, Kirchoff réalise le montage ci-dessous. Cette expérience représente la configuration témoin : une source chaude, émettant un spectre continu passant à travers une fente et un prisme, est projetée sur un écran.

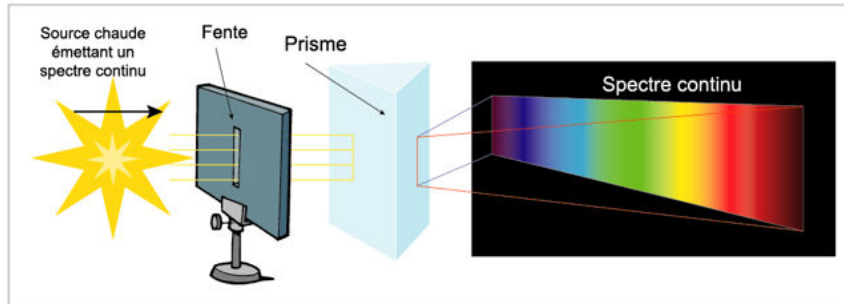


Figure 16.

Il observe donc ici un spectre continu comme prévu. Ce spectre est composé d'un étallement de couleur continu allant du rouge au violet. De nos jours, nous savons que ce type de spectre est produit par un solide ou un gaz chaud et opaque tel que le fer chauffé à blanc ou la surface des étoiles ayant peu d'atmosphère.

2.3 Deuxième expérience de Kirchoff

Dans un second temps, Kirchoff réalise le montage suivant : il place un nuage de gaz chaud et transparent à la place de la source lumineuse. Il répète la même expérience que précédemment et observe un spectre différent sur l'écran.

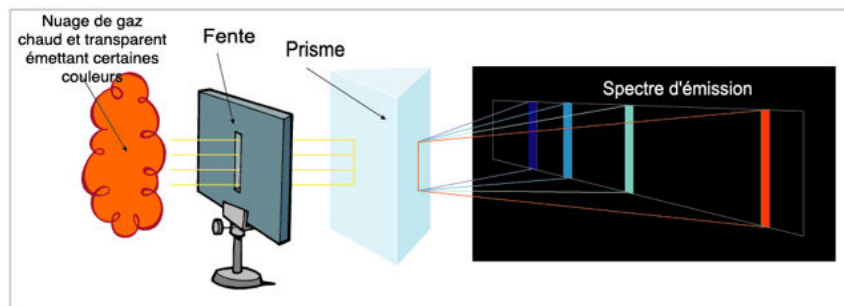


Figure 17.

Il observe donc ici un spectre composé de raies étroites sur un fond noir. On appelle celui-ci un spectre d'émission car il correspond à chaque élément chimique contenu dans le gaz.

2.4 Troisième expérience de Kirchoff

Enfin, Kirchoff remplace le nuage de gaz chaud et transparent par une source chaude combinée à un nuage de gaz froid et fait une observation tout à fait différente :

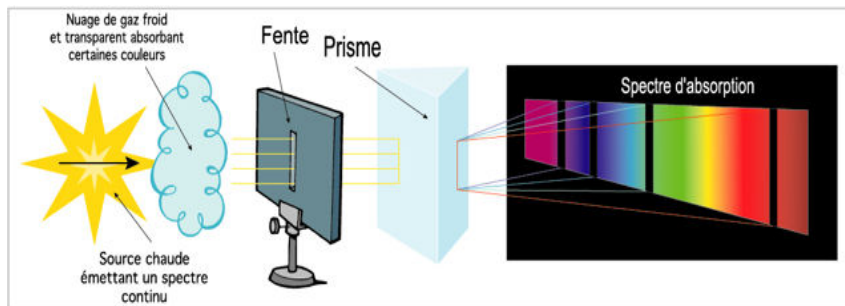


Figure 18.

Cette fois ci, le spectre obtenu n'est qu'une partie de celui de la source chaude qui est continu. Les raies manquantes représentent donc la lumière absorbée par le gaz froid. Il s'agit donc ici du spectre d'absorption. Les raies noires correspondent également aux éléments chimiques contenu dans le gaz.

2.5 Comment ça marche ?

Pour expliquer d'où viennent ces spectres nous allons utiliser l'exemple de l'hydrogène et regarder les déplacements possibles de son électron.

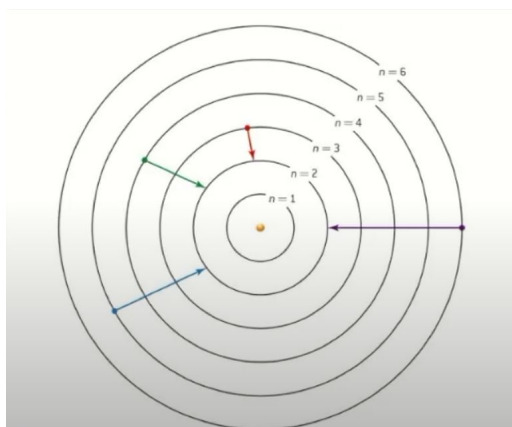


Figure 19.

Dans cet exemple, l'électron redescend sur la couche 2. Si il vient de la couche 3, l'énergie nécessaire à son déplacement est faible donc le photon qu'il libère contient peu d'énergie. Par conséquent la couleur qu'il projette aura une petite fréquence donc sa longueur d'onde sera grande. Il s'agit ici du rouge. Il va falloir un peu plus d'énergie si l'électron est issu de la couche 4 donc son photon contiendra plus d'énergie, sa fréquence sera plus élevée et la longueur d'onde plus faible. Il s'agira donc du vert. Le raisonnement est le même pour les autres couches, l'électron aura juste besoin de plus en plus d'énergie pour se déplacer.

Le spectre d'émission de l'hydrogène est donc le suivant :



Figure 20.

Chaque élément chimique possède un noyau atomique de charge positive différente. Son nombre d'électron étant également unique, il a donc une répartition orbitale propre. Cela signifie que l'énergie qu'il libère est toujours différente et donc que chaque élément chimique possède son propre spectre d'émission et d'absorption.

Enfin, quelles sont les applications de ces découvertes ? La spectroscopie est utile dans de nombreux domaines mais elle sert principalement aux astronomes afin de connaître la composition des étoiles. Cela permet de savoir quels éléments chimiques la constituent mais également son âge, sa température, sa distance ainsi que sa vitesse.

En conclusion, le domaine de la spectrographie a permis la mise en évidence d'un phénomène, entraînant une série de nouvelles découvertes : la discrétion des valeurs des raies sur les spectres. L'existence de ces valeurs discrètes a donné naissance à un nouveau modèle atomique : celui de Bohr.

5 Série de Balmer et modèle de Bohr

1 Série de Balmer

JOHANN JAKOB BALMER était un physicien et mathématicien suisse qui a découvert la formule de Balmer grâce aux résultats expérimentaux de HAGENBACH. Celui-ci étudiait les raies d'émission de l'hydrogène (image ci-dessous). Ces raies sont dues à la désexcitation des électrons de l'hydrogène qui émettent alors des photons d'une longueur d'onde donnée. Ces observations sont possibles grâce à la spectroscopie.



Figure 21. Spectre d'émission de l'hydrogène dans le visible

Grâce aux valeurs des longueurs d'onde il déduit que:

$$\lambda_m = B \frac{m^2}{m^2 - n^2} \text{ avec } n = 2 \text{ et } m = 3; 4; 5 \text{ ou } 6 \text{ et } B = 3,6456 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Cette formule permet de retrouver toutes les raies du spectre d'émission de l'hydrogène dans le visible. Dès lors Balmer envisage que d'autres séries de raies de l'hydrogène existent avec des valeurs de n différentes mais toujours entières. Les recherches de JOHANNES RYDBERG montrent plus tard que c'est le cas mais avec une légère modification de la formule:

$$\lambda_{m,n} = \frac{B}{4} \frac{m^2 n^2}{m^2 - n^2}$$

et ce pour m et n des entiers positifs non nuls avec $m > n$. On appelle série de Balmer la série des $\lambda_{m,2}$.

2 Modèle de Bohr

En 1913 NIELS BOHR publie un article présentant un nouveau modèle pour l'atome. Celui-ci reprend les principales caractéristiques de celui planétologique de RUTHERFORD mais y ajoute quelques hypothèses. Celles-ci tendent à vouloir expliquer la non-continuité des raies d'émission. Cependant il s'agit simplement d'un modèle parvenant à expliquer certaines expériences de l'époque, par exemple les expériences de Rutherford sur les spectres lumineux.

Les trois hypothèses majeures sont les suivantes:

1. Les orbites des électrons sont circulaires et stables (pas de perturbation à cause de dissipations d'énergie magnétique)

2. Le moment cinétique de l'électron est quantifié $L = n \frac{h}{2\pi}$ avec n un entier positif non nul
3. L'électron peut passer d'un niveau d'énergie à un autre en absorbant ou en émettant un photon

3 Obtention de la formule de Rydberg avec le modèle de Bohr

On cherche ici à obtenir la formule de Rydberg mais cette fois à l'aide du modèle de Bohr.

La seule force s'exerçant sur l'électron (de l'atome d'hydrogène) est la force électrostatique causée par le noyau puisque la force de gravitation peut être négligée.

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad \text{avec } r \text{ la distance entre le noyau et l'électron}$$

De plus la formule de la force centrifuge (force fictive) nous donne

$$F_c = m_e \frac{v^2}{r}$$

Ainsi l'on peut appliquer le PFD dans à l'électron dans son propre référentiel, il est dans ce cas immobile, on a donc :

$$-F = F_c \text{ (les forces sont colinéaires)}$$

donc

$$\mathbf{A} \quad m_e v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

et le moment cinétique L est donné par:

$$\vec{L} = \overrightarrow{\text{OM}} \wedge \vec{p} \text{ avec } \vec{p} \text{ la quantité de mouvement et } p = m_e v$$

donc ici

$$L = m_e v r$$

Avec l'hypothèse de Bohr on a que $L = n \frac{h}{2\pi}$ donc

$$v = \frac{n h}{2\pi m_e r}$$

On remplace dans l'équation **A** et on obtient:

$$\mathbf{B} \quad r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{m_e e^2 \pi}$$

On observe que le rayon est proportionnel à un entier.

On utilise maintenant une approche énergétique:

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

et

$$E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$$

On remplace par le v^2 obtenu avec **A**:

$$E_c = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Donc on a l'énergie mécanique totale

$$E = E_c + E_p = -\frac{e^2}{8 \pi \epsilon_0 r}$$

On remplace r par sa valeur selon n obtenue en **B**

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

On cherche maintenant la longueur d'onde d'un photon absorbé ou émis par le passage d'un électron du niveau d'énergie n au niveau m

$$h \nu = E_m - E_n \text{ (relation de Planck - Einstein)}$$

$$\Rightarrow h \nu = \frac{e^4 m_e}{8 \epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

avec $\lambda \nu = c$ on obtient

$$\lambda_{m,n} = \frac{8 \epsilon_0^2 h^3 c}{e^4 m_e} \left(\frac{m^2 n^2}{m^2 - n^2} \right)$$

On reconnaît la formule de RYDBERG avec $\frac{B}{4} = \frac{8 \epsilon_0^2 h^3 c}{e^4 m_e}$

4 Expérience de Franck et Hertz

En 1914, JAMES FRANCK et GUSTAV HERTZ mettent en oeuvre la première expérience permettant de prouver le modèle de Bohr. Ils cherchent ainsi à démontrer l'existence de la quantification des niveaux d'énergie au sein d'un atome. Pour ce faire, ils vont étudier les collisions entre des électrons et des atomes, afin de mesurer l'énergie transférée.

4.1 Chocs élastiques et chocs inélastiques

On considère la rencontre entre un électron et un atome telle que : $m_{\text{atome}} \gg m_{e^-}$, cela permet de négliger le recul de l'atome lors du choc.

D'après le principe de conservation de l'énergie, on a :

$$E_{c1}^i + E_2^i = E_{c1}^f + E_2^f$$

En notant l'électron projeté (1), l'électron de l'atome (2), l'énergie cinétique (E_c), l'énergie totale (E), l'état initial (i) et final (f).

On dira alors qu'un choc est élastique si $E_2^i = E_2^f$ et inélastique si $E_2^i \neq E_2^f$.

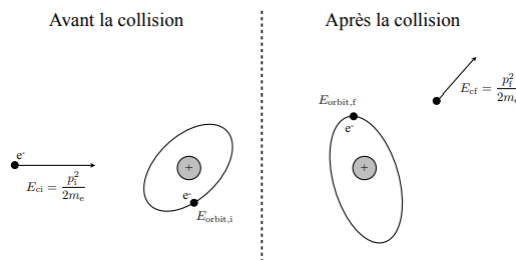


Figure 22. Illustration d'un choc

L'étude de ces chocs nous renseigne sur le caractère continu/discret de la distribution de charge. En effet, si celle-ci est continue, alors il ne se produit que des chocs inélastiques car l'électron échange n'importe quelle quantité d'énergie. En revanche si elle est discrète, les électrons doivent posséder une certaine énergie pour pouvoir la transmettre à l'atome : on a donc des chocs inélastiques pour certaines valeurs énergétiques et des chocs élastiques sinon.

4.2 Preuve par l'expérience

On utilise une enceinte remplie du gaz que l'on souhaite étudier.

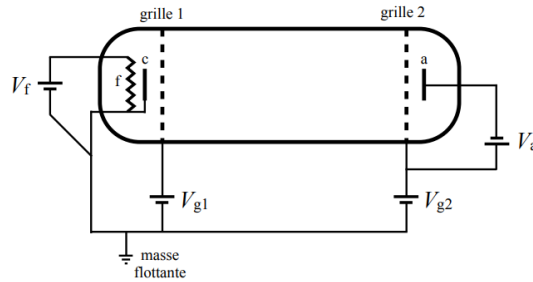


Figure 23. Schéma du montage de l'expérience

La cathode (c) est chauffée par un filament (f). On a donc une libération d'électrons à la surface de la cathode et ceux-ci sont arrachés de la surface grâce à la grille G1 ($\Delta V > 0$). La grille G2 va permettre de déplacer les électrons dans l'enceinte grâce à une plus grande différence de potentiel. Enfin, le potentiel à l'anode (a) est plus faible qu'en G2. De ce fait, seuls les électrons ayant suffisamment d'énergie pourront atteindre cette dernière.

Le processus de l'expérience consiste simplement à faire varier la tension en G2 (conséquence sur l'énergie cinétique des électrons) et à mesurer le courant à l'anode (I_a).

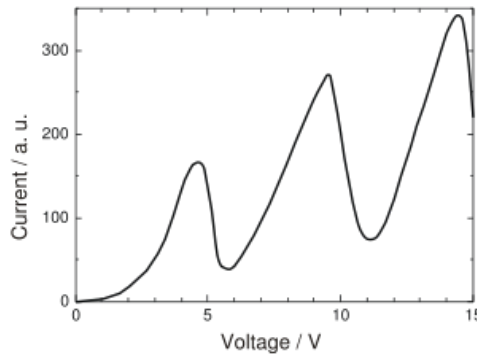


Figure 24. Mesure de I_a (mA) en fonction de U_{G_2} (V) avec du gaz de mercure

On observe alors que lorsque le potentiel de la grille 2 augmente, le courant à l'anode augmente. Cela s'explique par le fait que les électrons ont de plus en plus d'énergie pour pouvoir atteindre l'anode sans être retenu à la grille 2. Cependant, ils n'ont pas assez d'énergie pour en transmettre à un atome de gaz donc les chocs sont élastiques et ils ne perdent pas d'énergie.

Lorsque l'on arrive à $U_{G_2} = 4.9\text{ V}$, on passe un maximum de la courbe et on arrive à un creux. Cela signifie que les électrons ont suffisamment d'énergie pour la transmettre aux atomes de gaz. Les chocs deviennent inélastiques et il ne leur reste pas assez d'énergie pour vaincre la force électrique de la grille et atteindre l'anode. Mais I_a ne vaut pas 0 car tous les électrons ne percutent pas un atome.

En augmentant encore U_{G_2} , les électrons peuvent accumuler à nouveau de la vitesse après un premier choc et ce jusqu'à posséder l'énergie suffisante pour réaliser deux chocs inélastiques. On retrouve à nouveau un creux qui est moins important que le précédent car certains électrons ne réalisent pas de choc et d'autres en font un seul et ont donc assez d'énergie pour atteindre l'anode.

On constate alors que les atomes du gaz n'acceptent que certaines valeurs d'énergie : on a une quantification des niveaux d'énergie des électrons de l'atome.

J.Franck et G.Hertz recevront le prix nobel de la physique en 1925 pour cette expérience.

Ainsi, le modèle de Bohr fournit une description révolutionnaire du comportement des électrons dans les atomes. Cependant, l'effet photoélectrique a introduit l'idée de photons et a ouvert la voie à une nouvelle compréhension quantique de la nature. Cela a jeté les bases de la mécanique quantique et influencé notre vision de l'univers microscopique.

6 L'effet photoélectrique

1 Histoire de l'effet photo-électrique et explication

Tous d'abord, définissons le terme d'effet photo-électrique: il peut être défini comme l'émission des électrons d'un matériau conducteur sous l'effet de la lumière. Par extension il représente l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau sous l'effet de la lumière.

Décrivons les premières découvertes qui ont été faites et qui ont permis d'arriver à l'explication actuelle de l'effet photoélectrique. En 1873, Willoughby Smith découvre que la résistance électrique du sélénium (qui est un matériau semi-conducteur) varie en fonction de l'intensité de la lumière reçue. C'est ce qu'on appelle maintenant la photoconductivité. Et ensuite, Day et Adams vont découvrir qu'on peut créer un courant électrique à partir d'un sélénium éclairé. En 1883, Charles Fritts va mettre au point le premier panneau photovoltaïque, qui est une des conséquences de l'effet photoélectrique, mais qui a quand même été découvert avant.

Pour le principe : le dispositif consiste en une boîte de verre qui contient une feuille de sélénium logée entre deux couches métalliques : avec une supérieure de feuille d'or fine, et une inférieure qui était faite d'un substrat métallique de laiton.

Et lorsque de la lumière rentrait dans la boîte, ça produisait un courant électrique qui était transmis à travers un fil qui était à l'extrémité de la boîte, et donc voilà une première façon d'obtenir facilement de l'électricité avec de la lumière. Et il faut aussi dire que cette invention a révolutionné le monde de l'énergétique, cela sera expliqué lors de la dernière partie.

Mais ce phénomène est la cause d'un autre qui est plus large encore, qui est donc l'effet photoélectrique (ou la photoémission.) Et la première découverte importante a été faite par Hertz juste après la création du premier panneau photovoltaïque, en 1887. Il va observer que lorsqu'un rayonnement ultraviolet balayait une surface d'électrodes métalliques, une décharge électrique apparaissait (il avait juste remarqué une décharge parce que les électrons ne seront découverts que 10 ans après). Les premières explications du phénomène nous disaient que le champ électrique de la lumière chauffait les électrons pour les faire vibrer, ce qui finissait à partir d'une certaine énergie à les libérer de la surface du métal. Mais cette explication résidait sur le fait que la lumière n'était vue que comme une onde. Et ils ont donc fait les hypothèses suivantes à partir de ce modèle de la lumière :

L'énergie cinétique des photoélectrons émis (les électrons qui sont éjectés lors de l'exposition à la lumière) devrait être proportionnelle à l'intensité lumineuse de la lumière incidente. Le taux d'émission des électrons, qui est proportionnel au courant électrique mesuré, devrait augmenter avec la fréquence de la lumière. Et pour bien comprendre d'où viennent les hypothèses, je vais faire une analogie entre les ondes lumineuses et les vagues de l'océan. On va prendre 2 situations :

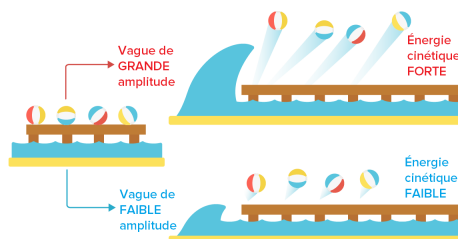


Figure 25.

Imaginez d'abord qu'une seule grande vague frappe le ponton, alors les ballons seront éjectés du ponton avec une bien plus grande énergie cinétique que s'ils étaient frappés par une petite vague. Et les physiciens ont donc pensé que le phénomène serait similaire avec de la lumière, c'est-à-

dire que l'amplitude de l'onde lumineuse serait proportionnelle à son énergie. Autrement dit, plus la lumière est intense, plus l'énergie des électrons serait élevée. Les physiciens du 19e ont aussi supposé qu'à amplitude constante, une augmentation de la fréquence augmenterait le nombre d'électrons éjectés. Pour revenir à l'analogie, ça veut dire que si plus de vagues frappent le ponton, alors un plus grand nombre de ballons seraient éjectés que dans le cas d'un nombre plus faible de vagues de même intensité (ou amplitude). Voilà pour les hypothèses. Le problème, c'est que les expériences ont montré que : L'énergie cinétique des photoélectrons augmente linéairement avec la fréquence de la lumière, mais ceci seulement à partir d'une certaine fréquence. (Quand ce seuil ν_0 n'est pas dépassé, aucun électron n'est rejeté.) Le courant électrique reste constant quand la fréquence de la lumière augmente. Le courant électrique augmente avec l'intensité lumineuse. L'énergie cinétique des photoélectrons reste constante quand l'intensité de la lumière augmente. Et comme vous pouvez le voir, ces observations ne sont pas en accord avec les hypothèses qu'on avait faites avant. Il y avait donc une contradiction entre le modèle ondulatoire de la lumière et les expériences de l'effet photoélectrique. Jusqu'à ce qu'un certain Einstein réussisse à trouver une théorie qui permette d'expliquer ce phénomène en 1905. Il va être le premier à proposer l'idée que la lumière agit "parfois" comme une particule quantifiable, en inspirant des travaux de Max Planck sur la notion de "quantum" d'énergie. Et son explication de l'effet photoélectrique est la suivante: lorsqu'un quantum d'énergie lumineuse arrive sur un face métallique, son énergie $h\nu$ est transférée à un électron pour le libérer d'un atome et l'éjecter de la surface (ça s'appelle de l'ionisation.) Et étant donné que les électrons sont liés au métal, il faut donc donner une énergie minimale qu'on va appeler W_s , qui est caractéristique du métal et qu'on appelle "fonction de travail". et Einstein va "crier la relation suivante:

Pour montrer ça, il va utiliser le principe de conservation d'énergie et elle nous dit que: l'énergie totale d'un photon incident E_{photon} est égale à la somme de l'énergie cinétique de l'électron éjecté, qu'on va noter $E_c(\text{électron})$. Et de l'énergie nécessaire pour arracher l'électron du métal W_s . D'où $E_{photon} = E_c(\text{électron}) + W_s$. Sauf que l'énergie d'un photon est égale à $h\nu$, et en réarrangeant l'équation. On a donc que $E_c(\text{électron}) = h\nu - W_s$.

Et on retrouve donc bien l'observation expérimentale qui nous disait que l'énergie cinétique du photoélectron augmentait linéairement avec la fréquence ν . Or l'énergie cinétique de l'électron est égale à $\frac{1}{2} m_{\text{électron}} * v_{\text{électron}}^2$. Et à partir de ces deux égalités on peut même déterminer la vitesse du photoélectron, avec $v_{\text{électron}} = \sqrt{\frac{2(h\nu - W_s)}{m_{\text{électron}}}}$, valable si $\nu \geq \nu_0$.

Et à propos de l'influence de l'intensité lumineuse de la lumière incidente: Comme on assimile la lumière à un flux de photons, plus l'intensité lumineuse de la lumière incidente est élevée, plus le nombre de photons heurtant la surface du métal est grand. Donc, le nombre d'électrons éjectés du métal durant une période de temps donné sera lui aussi plus élevé. Et ce tant que la fréquence de l'onde lumineuse est supérieure à la fréquence de seuil. Et enfin d'après nos relations, on a aussi bien le fait que l'augmentation de l'intensité lumineuse n'a pas d'effet sur l'énergie des photons, parce que ça ne dépend que de la fréquence.

Pour l'anecdote, Einstein obtiendra son seul prix Nobel grâce à cette découverte, en 1921.

1.1 Exemple

Fréquence minimale d'extraction pour le cuivre: On a que $W_s(\text{cuivre}) = 7,53 * 10^{-19} J$ d'après la relation d'Einstein, le cas limite où éclaire avec une lumière avec une fréquence seuil éjecte les électrons avec une vitesse quasi nulle, donc on peut dire que dans ce cas là, $E_c(\text{électron}) = 0$ D'où $h\nu_0 = W_s$, donc $\nu_0 = \frac{W_s(\text{cuivre})}{h}$ d'où $\nu_0 = \frac{7,53 * 10^{-19}}{6,626 * 10^{-34}} = 1,14 * 10^{15} \text{Hz}$. En utilisant le fait que $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$ (avec c vitesse de la lumière), on obtient que $\lambda_0 = 2,63 * 10^{-7} \text{m}$. Il faut donc éclairer avec une lumière dans le spectre de l'UV si on veut espérer avoir un effet photoélectrique avec le cuivre.

1.2 Lien entre effet photo-électrique et transition de niveau énergétique des électrons

Rappelons d'abord le fait que les niveaux d'énergie de l'électron sont quantifiés. Et la répartition de ces niveaux de l'électron sont propres à chaque atome. Pour un nombre n d'états possibles de l'électron, il est possible de faire passer ce dernier d'un état $k = 1$ à un autre état $k \geq 2$, et ce

si et seulement si on lui apporte l'énergie nécessaire EXACTE. Cette énergie apportée provient majoritairement de photons, possédant l'énergie nécessaire requise. Et si le photon possède une énergie minimale à partir de laquelle l'électron ne peut plus contenir cette énergie dans ses états stables, il sera éjecté du matériau, car le photon a dépassé l'énergie d'extraction de la liaison de l'électron (le terme W_s utilisé précédemment).

Mais remarquons que l'effet inverse est possible, un électron peut revenir à un état plus "fondamental" en cédant de l'énergie pour devenir plus stable. Cet excès d'énergie se transmet sous la forme d'un photon, possédant l'énergie exacte du surplus, et donc une fréquence particulière. Ce phénomène peut être considéré comme un effet inverse de l'effet photo-électrique. Et nous pouvons faire le lien entre ce dernier et les spectres d'émission des atomes qui sont uniques, comme expliqué dans la partie Spectrophotographie et la partie Balmer et Bohr.

2 Applications de l'effet photo-électrique dans la vie courante.

2.1 Les panneaux photovoltaïques

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans la fabrication de cellules solaires en raison de son efficacité et de son abondance. Le silicium compose environ 28% des roches de la croûte terrestre ce qui fait qu'il n'est pas rare du tout. Il existe deux types principaux de silicium cristallin utilisés : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin (ou multicristallin).

-Silicium monocristallin : Les cellules solaires en silicium monocristallin sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium pur. Les cellules monocristallines ont généralement un rendement supérieur à 20 %.

-Silicium polycristallin : Les cellules solaires en silicium polycristallin sont fabriquées à partir de blocs de silicium contenant plusieurs cristaux. Ce processus de fabrication est moins coûteux et produit des cellules avec un rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines. Les cellules polycristallines ont généralement un rendement compris entre 15 % et 18 %. La fabrication du silicium cristallin utilisé dans les cellules solaires implique les étapes suivantes :

Extraction et purification du silicium à partir de la silice présente dans le sable ou la quartzite.

Création de lingots de silicium cristallin.

Tronçonnage des lingots en fines tranches d'environ 200 micromètres.

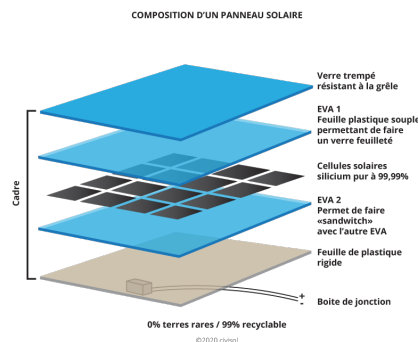


Figure 26.

2.2 Détecteurs de fumée:

Les détecteurs de fumée utilisent principalement l'effet photoélectrique pour détecter la présence de fumée dans l'air. Ce principe repose sur la mesure des variations d'intensité lumineuse causées par la présence de particules de fumée dans un espace confiné.

Le détecteur de fumée est équipé d'une source lumineuse, généralement une diode électroluminescente (LED) ou une lampe à incandescence. Cette source émet un faisceau lumineux constant à l'intérieur de l'appareil. En face de la source lumineuse, il y a un récepteur sensible à la lumière, comme une photodiode ou un phototransistor. Ce récepteur est capable de mesurer l'intensité lumineuse.

Lorsqu'il n'y a pas de fumée présente dans la chambre, le faisceau lumineux émis par la source atteint directement le récepteur avec peu ou pas de diffusion. Cependant, lorsque de la fumée pénètre dans la chambre, les particules de fumée dispersent la lumière émise par la source. Certaines de ces particules peuvent également être ionisées. Cette diffusion de la lumière entraîne une diminution de l'intensité lumineuse détectée par le récepteur. Le récepteur détecte ce changement d'intensité et envoie un signal au circuit de détection.

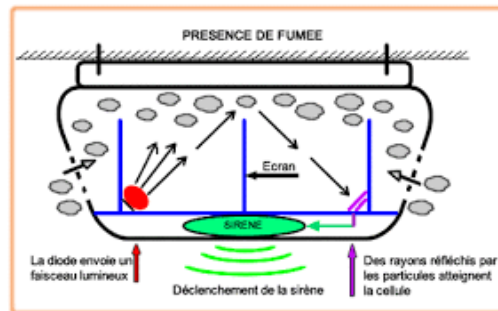


Figure 27.

2.3 Lecteurs de code barre

Un lecteur de code-barres utilise un faisceau de lumière, généralement un laser ou une diode électroluminescente (DEL), pour illuminer le code-barres. Lorsque la lumière frappe les barres et les espaces du code-barres, une partie de la lumière est réfléchiée et une autre partie est absorbée.

L'effet photoélectrique intervient lors de la détection de la lumière réfléchiée. Les lecteurs de codes-barres sont équipés d'un capteur photoélectrique qui convertit la lumière en signaux électriques. Ce capteur détecte les variations d'intensité lumineuse causées par les barres et les espaces du code-barres.

Le signal électrique généré par le capteur est ensuite converti en données numériques à l'aide d'un circuit de décodage. Le système de décodage interprète ces données et les associe aux informations contenues dans le code-barres, telles que le numéro d'identification du produit.

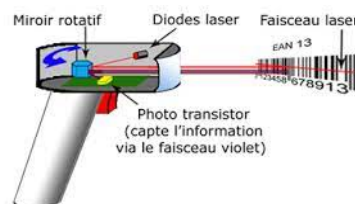


Figure 28.

2.4 Tubes photomultiplicateurs

Les Tubes PhotoMultiplicateurs ont de très nombreuses utilisations : spectromètres, les spectrographes, les compteurs de photons, télescopes et caméras pour l'astronomie, détecteurs de particules pour enregistrer les interactions des particules subatomiques, détecteurs de rayonnement pour mesurer l'intensité des rayonnements ionisants (en association avec un scintillateur) tels que les rayons gamma et les rayons X.

Un TPM est composé d'une photocathode, d'une série de dynodes et d'une anode. Lorsque des photons lumineux frappent la photocathode, ils libèrent des électrons selon l'effet photoélectrique. Ces électrons sont ensuite accélérés vers les dynodes, qui sont des électrodes disposées en cascade, chacune maintenue à un potentiel électrique légèrement plus élevé que la précédente.

À chaque collision avec une dynode, les électrons libèrent des électrons supplémentaires, créant ainsi une cascade d'amplification. Ce processus permet d'amplifier de manière exponentielle le nombre d'électrons initialement émis par la photocathode.

Finalement, les électrons amplifiés sont collectés par l'anode du TPM, générant ainsi un courant électrique proportionnel à l'intensité lumineuse incidente.

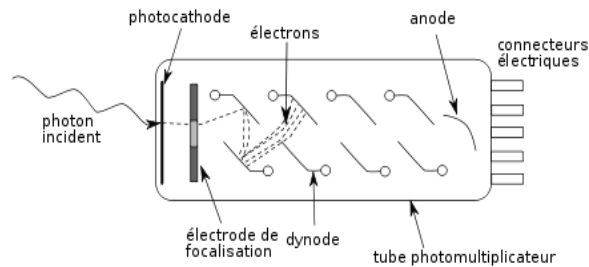


Figure 29.

2.5 Appareils photo-numériques

Les appareils photo numériques sont équipés d'un capteur d'image, généralement un capteur de type CCD (Charge-Coupled Device) ou CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) (en vert foncé sur le schéma ci-dessous). Ces capteurs sont sensibles à la lumière et convertissent la lumière en signaux électriques à l'aide de l'effet photoélectrique.

Lorsque la lumière entre dans l'appareil photo à travers l'objectif, elle frappe le capteur d'image. Les photons de lumière excitent les électrons dans les pixels du capteur. Ces électrons éjectés sont ensuite collectés et convertis en signaux électriques.

Les signaux électriques obtenus à partir des pixels du capteur sont ensuite convertis en données numériques représentant l'image capturée. Ces données numériques sont traitées par le processeur de l'appareil photo pour former une image numérique, qui peut ensuite être visualisée sur l'écran LCD de l'appareil ou enregistrée sur une carte mémoire.

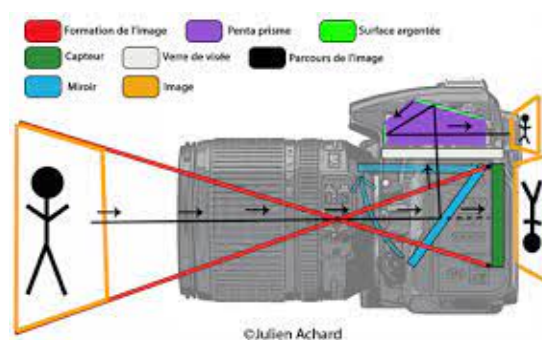


Figure 30.

2.6 Lien entre photosynthèse et effet photoélectrique

La photosynthèse et l'effet photoélectrique sont deux processus liés à la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique ou électrique, respectivement.

La photosynthèse est le processus par lequel les plantes, les algues et certains types de bactéries convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique pour produire des hydrates de carbone, tels que le glucose. Ce processus se produit dans les chloroplastes, où la lumière est captée par des

pigments, tels que la chlorophylle, qui absorbent certaines longueurs d'onde de la lumière. L'énergie lumineuse est ensuite utilisée pour exciter les électrons dans les molécules de chlorophylle, générant ainsi de l'énergie chimique qui alimente la synthèse de molécules organiques.

D'un autre côté, l'effet photoélectrique est un phénomène physique par lequel les photons éjectent des électrons d'une surface métallique.

Bien qu'il puisse sembler y avoir une certaine similitude entre la photosynthèse et l'effet photoélectrique dans leur capacité à absorber la lumière, leur fonction et leur mécanisme sous-jacents sont très différents. La photosynthèse est un processus biologique complexe qui implique de nombreux composants cellulaires spécifiques, tandis que l'effet photoélectrique est un phénomène physique basé sur les propriétés des matériaux.

3 L'effet Compton

3.1 Introduction

L'effet Compton est la modification de la fréquence du rayonnement diffusé par un électron libre, avec un écart spectral qui ne dépend que de l'angle de diffusion. Il a été découvert en 1923 par Arthur Compton, un physicien américain, en irradiant du graphite avec des rayons X de longueur d'onde $\lambda_0 = 70 \text{ pm}$. Le faisceau de rayons X émergent était ensuite filtré à l'aide d'un spectromètre, et il put alors observer que le spectre montrait deux raies spectrales distinctes. Une de la même longueur d'onde λ que le rayon incident, et une dont la longueur d'onde λ' dépendait uniquement de l'angle de diffusion θ du rayonnement incident. En réalisant de nombreuses fois la même expérience, Arthur Compton a déterminé que la variation de longueur d'onde suivait la loi expérimentale suivante :

$$\Delta\lambda \approx 2.43(1 - \cos(\theta))$$

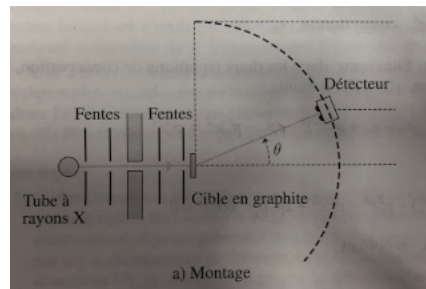


Figure 31.

3.2 Fonctionnement de l'effet Compton

L'effet Compton ressemble beaucoup à l'effet photoélectrique, on pourrait même dire que c'est un «cas particulier» de ce dernier. En effet, alors qu'avec l'effet photoélectrique, le photon incident est absorbé par l'atome et son énergie transmise à un électron, lui permettant de s'échapper, l'effet Compton permet d'observer un «rebond» du photon sur l'électron. En gros, on a le même effet que lorsque deux boules de billard se percutent. On peut faire cette analogie car quand on regarde l'énergie du photon et de l'électron ainsi que leurs quantités de mouvement (qui résultent de la mécanique classique), on trouve un comportement exactement similaire à celui des boules de billard. C'est donc particulièrement la découverte de l'effet Compton qui a permis aux physiciens de confirmer la théorie de l'aspect corpusculaire de la lumière, puisqu'une onde ne pourrait pas se comporter de la sorte au contact d'un corps tel que l'électron.

Il est important de noter que contrairement à l'effet photoélectrique, qui concerne surtout des électrons liés, l'effet Compton peut être observé principalement lorsqu'on considère un électron libre. Lorsque le photon entre en collision avec l'électron, l'électron est éjecté de l'atome, qui est donc ionisée, mais à la grande différence de l'effet photoélectrique, le photon incident n'est pas absorbé, il est diffusé avec un certain angle de diffusion θ , et on constate une variation de la longueur d'onde. Comme évoqué précédemment, l'effet Compton est l'ultime observation qui a fini par convaincre la plupart des physiciens de la dualité onde-corpuscule de la lumière, bien qu'Einstein ait déjà émis cette hypothèse grâce à l'observation de l'effet photoélectrique.

3.3 Interprétation de l'expérience

On considère qu'on peut utiliser les formules de conservation de l'énergie dans le système { photon - électron }, puisqu'on considère ici une collision élastique entre un photon et un électron libre du graphite ayant une énergie cinétique négligeable devant celle du photon.

on écrit donc les équations suivantes :

$$E_\gamma + E_e = E'_\gamma + E'_e \text{ et } p_\gamma + 0 = p'_\gamma + p'_e$$

où p_γ est la quantité de mouvement du photon incident, p'_γ celle du photon diffusé et p'_e celle de l'électron juste après collision.

Puisque le photon a une masse nulle, la formule relativiste de la conservation de l'énergie nous donne :

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \text{ ce qui donne } E_\gamma = p_\gamma c$$

on a l'expression vectorielle suivante :

$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}'_e$$

ce qui, au carré, donne

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - 2\vec{p}_\gamma \cdot \vec{p}'_\gamma$$

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - 2 p_\gamma p_\gamma' \cos(\theta)$$

θ correspondant à l'angle de diffusion de photon, c'est-à-dire l'angle entre la direction du photon après contact et la direction d'origine.

De l'autre côté, on utilise la formule relativiste de la conservation de l'énergie, qui donne (avec $p_e = 0$)

$$p_\gamma^2 c^2 + m_e^2 c^4 = p_\gamma'^2 c^2 + p_e'^2 c^2 + m_e^2 c^4$$

$$\Rightarrow p_\gamma c + m_e c^2 = p_\gamma' c + \sqrt{p_e'^2 c^2 + m_e^2 c^4}$$

$$\Rightarrow (p_\gamma c + m_e c^2 - p_\gamma' c)^2 = p_e'^2 c^2 + m_e^2 c^4$$

$$\Rightarrow (c(p_\gamma - p_\gamma') + m_e c^2)^2 - m_e^2 c^4 = p_e'^2 c^2$$

$$\Rightarrow \frac{(c^2 (p_\gamma - p_\gamma')^2 + m_e^2 c^4 + 2 m_e c^3 (p_\gamma - p_\gamma') - m_e^2 c^4)}{c^2} = p_e'^2$$

$$\Rightarrow p_e'^2 = (p_\gamma - p_\gamma')^2 + 2 m_e c (p_\gamma - p_\gamma')$$

On peut ensuite identifier nos 2 expressions de p_e^2 et on obtient alors :

$$(p_\gamma - p'_\gamma)^2 + 2 m_e c (p_\gamma - p'_\gamma) = p_\gamma^2 + p'^2_\gamma - 2 p_\gamma p'_\gamma \cos \theta$$

$$\Rightarrow m_e c (p_\gamma - p'_\gamma) = p_\gamma p'_\gamma (1 - \cos \theta)$$

D'après la relation de Planck-Einstein, qui nous dit que l'énergie est liée à la fréquence par la relation $E = h \nu$, on peut utiliser les formule $\nu = \frac{c}{\lambda}$ et $E_\gamma = p_\gamma c$ pour un photon.

$$E_\gamma = h \nu_\gamma \Leftrightarrow p_\gamma c = \frac{h c}{\lambda_\gamma} \Leftrightarrow p_\gamma = \frac{h}{\lambda_\gamma}$$

Ainsi, l'équation précédente nous permet d'obtenir

$$\frac{m_e c \cdot h (\lambda_\gamma - \lambda'_\gamma)}{\lambda_\gamma \lambda'_\gamma} = \frac{h^2}{\lambda_\gamma \lambda'_\gamma} (1 - \cos \theta)$$

$$\Rightarrow \Delta \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Dans cette expression, on trouve le facteur constant $\frac{h}{m_e c}$ qu'on va alors nommer « longueur d'onde de Compton de l'électron ». On le note λ_C et sa valeur est $\lambda_C = 0,024 \text{ \AA}$. Cela signifie donc que la variation de longueur d'onde du photon dépend uniquement de son angle de diffusion θ .

On peut d'ailleurs noter que lorsque $\theta = 0$, on a $\Delta \lambda = 0$.

3.4 Relation entre l'angle de diffusion du photon et l'angle d'éjection de l'électron

La relation permettant de définir l'angle ϕ d'éjection de l'électron en fonction de l'angle θ de diffusion du photon est la suivante :

$$\frac{1}{\tan \phi} = (1 + \alpha) \tan \frac{\theta}{2}$$

avec $\alpha = \frac{E_0}{m_e c^2}$, expression dans laquelle E_0 correspond à l'énergie du photon incident avant la collision.

Cette relation induit que si $\theta = \pi$, alors on a $\phi = 0$. Cela est facile à comprendre par analogie avec le billard : lorsque la boule blanche (photon) tape directement dans une autre boule (électron) de façon que la blanche revienne en arrière ($\theta = \pi$), alors l'autre boule va gén

éralement vers l'avant ($\phi = 0$).

Mais aussi, si $\theta = 0$, alors $\phi = \frac{\pi}{2}$. Ce cas est plus difficile à comprendre mais peut aussi être expliqué par une analogie avec le billard. Lorsqu'on fait taper la boule blanche (photon) dans une autre boule (électron) de façon que la blanche ne change presque pas de direction et continue tout droit ($\theta = 0$), alors la boule blanche n'a fait qu'effleurer l'autre boule qui est déplacée perpendiculairement à la trajectoire de la blanche ($\phi = \frac{\pi}{2}$).

Conclusion

En conclusion, la fin du 19^{ème} siècle ainsi que le début du 20^{ème} marquent un grand tournant dans le monde de la physique, puisque c'est durant cette période qu'une multitude de découvertes liées à la composition de la matière à une échelle plus que microscopique ont eu lieu. En effet, le regroupement de toutes les découvertes que nous avons abordé en P6 pendant ce semestre forme un point de départ de toute la physique quantique, une physique remplie de concepts très différents de ceux que nous avons connus avec la mécanique classique.

Nous avons seulement pu approcher ce thème avec notre projet, puisque le but était de nous introduire à la mécanique quantique. Néanmoins cela nous a permis d'en comprendre les concepts fondamentaux, tels que la composition des atomes, le fonctionnement de la radioactivité, de la spectroscopie, les séries de Balmer et les fondements du modèle de Bohr et enfin l'effet photoélectrique.

Nous n'avons pas pu approfondir le sujet en nous penchant sur la mécanique quantique en soi, puisque ce n'était pas l'objectif de notre projet. Mais nous pensons que nous avons à présent toutes les clefs en main pour comprendre les concepts plus complexes de la mécanique quantique, comme par exemple, le paradoxe du chat de Schrödinger et le principe de superposition.