

Chapitre VI

Physique quantique

En 1818, Augustin Fresnel gagne un concours de l'Académie des Sciences présidée par Pierre-Simon de Laplace sur la nature de la lumière. Les partisans des grains de lumière doivent reconnaître que la lumière est une et non un ensemble de particules. C'est Einstein en 1905 en expliquant l'effet photoélectrique par son caractère corpusculaire qui redonnera du sens aux grains de lumière. Cela lui vaudra le prix Nobel en 1921.

 **Relire le chapitre II Optique ondulatoire** 

Première (spé)

- Énergie d'un photon. Description qualitative de l'interaction lumière-matière.
- **Quantification** des niveaux d'énergie des atomes. Absorption et émission.
- Exploiter un diagramme de niveaux d'énergie en utilisant $\lambda = c/\nu$ et $\Delta E = h\nu$.

Terminale (spé)

- Le photon : énergie, vitesse, masse.
- **Effet photoélectrique**. Travail d'extraction.
- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter l'effet photoélectrique à l'aide du **modèle particulaire** de la lumière.
- Établir la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.
- Citer des applications mettant en jeu l'interaction photon-matière.
- **Diffraction** d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques.
- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées
- Exploiter l'angle de diffraction en fonction de la longueur d'onde et la taille de l'ouverture.

Grandeurs scalaires principales :

Grandeur physique	Symbole	Unité du S.I.	Dimension
fréquence	f, ν		
fonction d'onde	ψ		1
énergie d'une particule	E	J (.....)	ML^2T^{-2}

I. Particule de lumière

https://javalab.org/en/electroscope_en/

[Photoelectric Effect Demonstration.mp4](#)

Un électroscope est un dispositif qui permet de détecter un excès de charge.

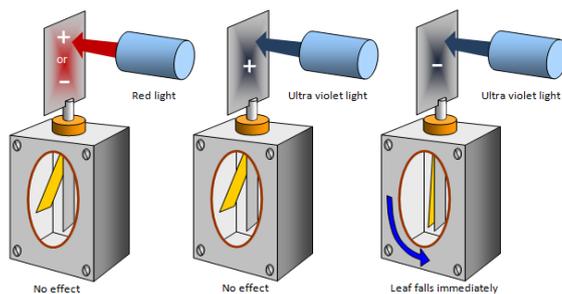
charge	positive +	négative -
lumière		
rouge ou blanche		
bleu ou UV		

- ✓ Du zinc chargé négativement se décharge sous l'effet d'un éclairage particulier.

A . Effet photoélectrique (1900)

L'effet photoélectrique découvert par Henri Becquerel en 1839 ne peut pas s'expliquer par le caractère de la lumière. Si la plaque est chargée positivement, il n'y a pas de décharge.

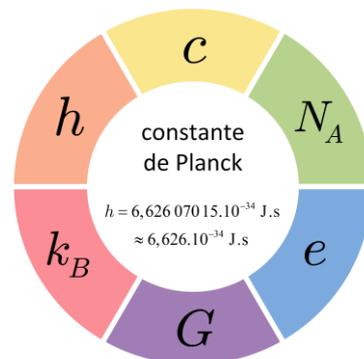
Plus la lumière est proche du voire des UV, plus la plaque se décharge rapidement alors qu'une lumière ou n'a aucun effet sur le dispositif.



La lumière doit être considéré comme un pour cette expérience. Les particules ou quanta de lumière appelées **photons** entrent en collision avec les responsables de la charge négative qui sont alors expulsés de la plaque. Mais ça n'explique pas pourquoi les photons fonctionnent et pas les photons

Max Planck (1858–1947, prix Nobel 1918) propose en 1900 que les quanta de lumière ont chacun une énergie totale E proportionnelle à la fréquence ν de l'onde lumineuse :

avec $h = 6,626.10^{-34}$ la constante de Planck, c la célérité dans le vide et λ la longueur d'onde



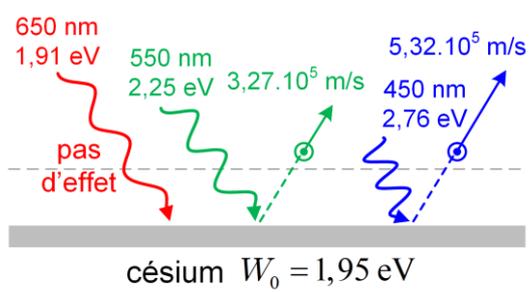
Plus le photon a une longueur d'onde petite donc une fréquence grande, plus son énergie sera importante :

...

Les photons rouges énergétiques n'ont pas d'effet sur les électrons contrairement aux photons bleus énergétiques qui parviennent à expulser les électrons.

Le travail d'extraction ou travail de sortie W_0 est
 Si le photon a une énergie W alors une partie de son énergie servira à extraire l'électron du métal et l'autre partie sera convertie en énergie cinétique E_C :

$=$ $+$



D'où $E_C =$ avec $m_e = 9,109.10^{-31}$ kg et $e = 1,602.10^{-19}$ C

Retrouver les valeurs numériques du schéma avec le césium en partant des λ .

Ordres de grandeur de quelques travaux d'extraction W_0 :

élément	<i>K</i>	<i>Na</i>	<i>Li</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>
travail de sortie (eV)	2,29	2,36	2,93	3,63	4,20	5,10

Source : Handbook 2010

B. Energie et impulsion

Si la lumière a un comportement **corpusculaire** *i.e.* s'il existe des phénomènes ne pouvant être expliqués qu'avec la particule de lumière alors le photon a-t-il les propriétés des autres particules à savoir une, une et une

Point de départ : Le 27 septembre 1905, est publié l'article "L'inertie d'un corps dépend-il de son contenu en énergie ?" où Albert Einstein écrit au sujet des noyaux radioactifs : "... Nous arrivons à la conclusion plus générale que la masse est une mesure de son contenu en énergie ; si son énergie change de L , sa masse change de la même façon de $L/9.10^{20}$."

Traduction : Si la variation d'énergie vaut $\Delta E = L$ alors la variation de masse vaut :

$$\Delta m = \frac{\dots}{\dots} \text{ qu'on réécrit : } \Delta m = \frac{\dots}{(\dots \times \dots)} = \frac{\dots}{\dots} \Leftrightarrow \dots = \Delta m \times \dots$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide en cm.s^{-1} du temps d'Einstein

L'énergie d'une particule au repos vaut de façon plus moderne : $E_0 =$

1. Un peu de relativité restreinte (1905)

En relativité restreinte, lorsqu'une particule est en mouvement à la vitesse v , tout se passe comme si sa masse m était remplacée par une masse relativiste γm où :

$$\gamma = \frac{1}{\dots} = \dots, \text{ facteur de Lorentz}$$

L'énergie totale vaut $E =$ et la quantité de mouvement $\vec{p} =$ au lieu de $\vec{p} = m\vec{v}$.

On remarque que : $E^2 =$

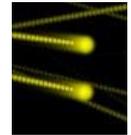
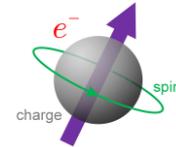
On développe : $E^2 =$

Ainsi, (vrai pour toute particule de lumière ou de matière)

2. Relation de De Broglie (1924)

Modèle standard de la physique des particules :

particule	découvert	masse (kg)	charge
électron	1887		
photon	1905		



Puisque $m = \dots$ pour un photon, $E \neq \gamma mc^2$ mais $E = h\nu$ et en conservant la relation :

$$E = h\nu = \Leftrightarrow \boxed{} \quad (\text{pour un photon})$$

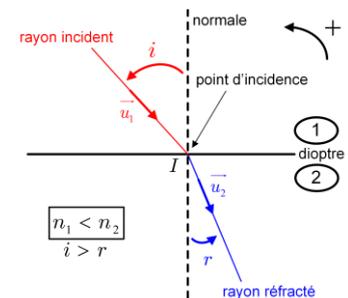
Un photon n'a donc mais possède belle et bien une quantité de mouvement, on parle aussi d'..... du photon. Sa vitesse est toujours la même, elle vaut c .

Salvati : En toute rigueur, la quantité de mouvement est \vec{p} , sa norme vaut p et ce qu'on appelle "impulsion" est une variation de la quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ ou $\Delta p = \Delta E/c$.

On peut définir vectoriellement la quantité de mouvement \vec{p} .

En optique géométrique, un rayon lumineux suit une courbe qui est d'ailleurs dans un milieu transparent homogène isotrope. Soit \vec{u} un vecteur unitaire tangent à sa trajectoire.

La quantité de mouvement est tangente à la trajectoire : $\vec{p} = p\vec{u}$.



Soit $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ la constante de Planck réduite ("h barre")

On a donc $p = \frac{\dots}{\dots} = \Leftrightarrow \boxed{\phantom{p = \frac{\dots}{\dots}}}$ où k est la norme du vecteur d'onde (chapitre II p.9)

On définit enfin le : $\vec{k} = k\vec{u}$ colinéaire à \vec{p} et de norme $k =$

Dans un milieu opaque, le photon est absorbé, on parle de choc comme lors de l'effet photoélectrique. Dans un milieu transparent (indice m) différent du vide (indice 0), la particule de lumière entre en collision sans disparaître, on parle de choc élastique.

Le trajet encombré des photons à l'échelle microscopique conduit à un de la lumière à l'échelle macroscopique, la vitesse de la lumière diminue d'un facteur n qui n'est autre que l'..... : $v = c/n$. On rappelle que λ est aussi modifiée :

...

La quantité de mouvement du photon est

II . Dualité onde-corpuscule

Si la lumière se comporte comme la matière alors la matière devrait pouvoir se comporter comme la lumière *i.e.* si la lumière a un comportement alors la matière devrait avoir un comportement pour certains phénomènes.

A . Onde de matière

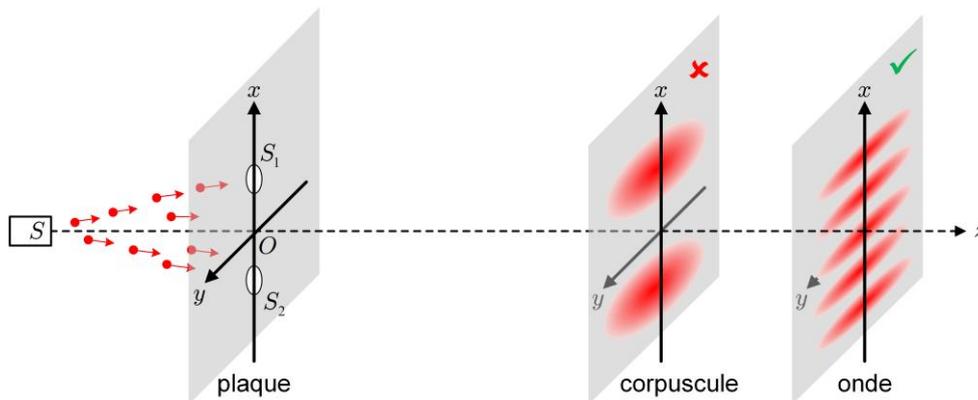
[Interférences optiques.php](#)

[Interférences de surface.mp4](#)

En 1807, Thomas Young montre la nature ondulatoire de la lumière (chapitre II page 12). L'expérience peut être faite avec toutes les ondes, en particulier, les ondes à la surface de l'eau. On réalise l'expérience d'Young avec un **jet d'électrons** et on s'attend à obtenir une répartition **homogène** des électrons car les électrons ne sont pas des ondes : la probabilité de détecter un électron doit être la même partout sur la surface du capteur.

[Interférences électroniques.mp4](#)

[Interférences biomoléculaires.mp4](#)



La répartition ressemble à des

Les électrons peuvent être considérés comme des
 Le jet de particules peut être appelé de
 particules, d'électrons, de molécules. 400 μm × 400 μm →

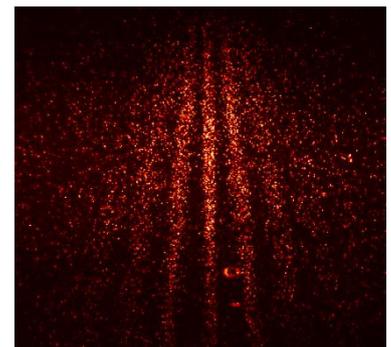
La **relation de De Broglie** devient intéressante lorsqu'elle est utilisée pour des particules et plus pour la lumière puisqu'on peut utiliser $p = mv$, on a alors :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \text{ (pour un électron)}$$

➤ Ordre de grandeur : $v = 150 \text{ m.s}^{-1}$, $m = 514u = 8,53 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$ avec $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Ce qui donne $\lambda \approx \dots\dots\dots \text{ pm}$. L'interfrange vaut $i = \frac{\lambda D}{a}$ (chapitre II page 14).

Avec $a = 100 \text{ nm}$ et $D = 564 \text{ mm}$, $i \approx \dots\dots\dots \mu\text{m}$, c'est bien à peu près le douzième de l'image.



➤ Dualité onde/corpuscule :

	modèle avant 1900	modèle après 1900	expliqué par le modèle quantique
lumière			
matière			

La probabilité de mesurer un électron à un endroit est liée à son caractère ondulatoire.

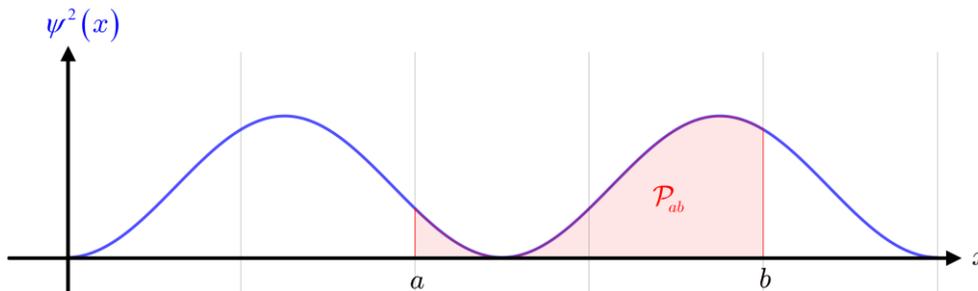
Erwin Schrödinger en 1925 propose d'introduire une notée $\psi(x, t)$ qui aura le même rôle pour la matière que l'amplitude $u(x, t)$ d'une onde (chapitre II page 7) :

$$\psi(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi) \text{ (cette expression n'est pas du tout générale pour } \psi \text{)}$$

Pour déterminer la probabilité \mathcal{P} de trouver une particule le long d'un axe x , on prend le carré de la norme de la fonction d'onde $|\psi|^2$ car elle doit être réelle et positive comme l'intensité lumineuse I (chapitre II page 12) qu'on intègre sur un intervalle de l'axe x :

Probabilité \mathcal{P}_{ab} de trouver la particule entre $x = a$ et $x = b$:

=



La probabilité de trouver une particule sur un axe x dépend donc de l'expression de ψ .

Salviati : Les fonctions sinus ou cosinus sont intéressantes pour des particules restreintes sur un intervalle de distance $L = b - a$ mais une telle fonction pose problème si la particule peut se mouvoir pour tout $x \in \mathbb{R}$. Il faut alors que la fonction ψ soit de carré sommable *i.e.* son carré doit pouvoir être intégré de $-\infty$ à $+\infty$, c'est le cas pour la fonction dont l'intégrale sur \mathbb{R} est une intégrale de Gauss (Thermodynamique chapitre 0 page 10).

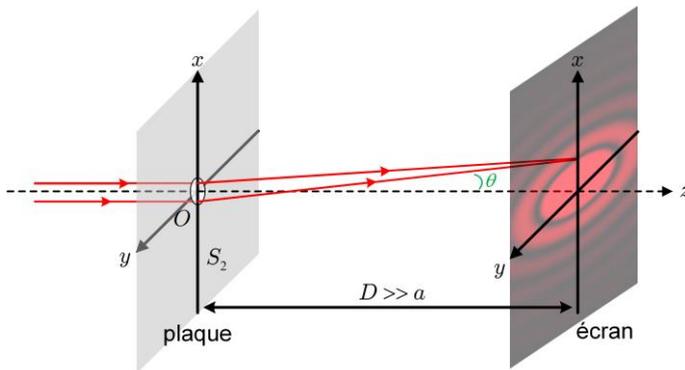
B. Inégalité spatiale d'Heisenberg (1927)

Salviati : Du point de vue de la mécanique quantique, les photons ou les électrons ne sont ni des points, ni des sphères, ni des ondes mais dans certaines situations où on essaye de comprendre un phénomène physique, on peut les modéliser comme les uns ou les autres.

domaine	optique	modèle	mécanique	modèle
$\lambda \gg \ell$				
$\lambda \approx \ell$				

où λ est la longueur d'onde et ℓ une longueur caractéristique du système

Objectif : Interpréter le phénomène de diffraction de la lumière par la notion de photon.



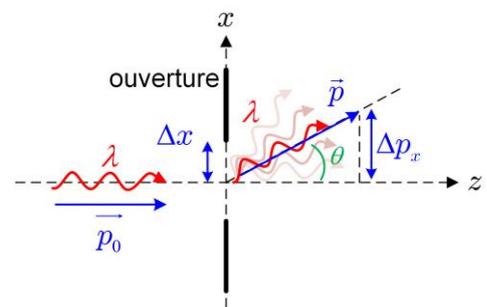
Lorsqu'on observe la diffraction de Fraunhofer *i.e.* à l'infini, le faisceau est élargi d'un angle maximal θ . La différence de chemin optique δ entre les faisceaux est telle que :

$$\sin \theta = \frac{\dots}{\dots} \text{ or pour des interférences constructives, } = \dots \text{ où } p \in \mathbb{Z} \text{ (chapitre II page 14)}$$

Au 1^{er} ordre *i.e.* pour $p = 1$, on retrouve la relation utilisée au lycée : $\sin \theta \approx \theta = \frac{\dots}{\dots}$

Du point de vue corpusculaire, le photon passe par le trou puis poursuit son trajet vers l'écran.

➤ Concernant sa position, restreindre le photon à passer par le trou signifie qu'on sait à peu près où il se trouve comme si on avait à ce moment-là :



Sa position se trouve entre $x = \dots$ et $x = \dots$.

On peut dire qu'elle vaut $x = \dots$. Comme résultat de mesure, $x = \bar{x} \pm u(x)$ avec $\bar{x} = 0$.

On en déduit que l'incertitude sur la position vaut : $u(x) = \dots$

➤ Concernant sa quantité de mouvement, elle est connue, elle vaut $p = h/\lambda$.

L'incertitude porte sur la direction et le sens de \vec{p} après l'ouverture *i.e.* sur la composante p_x qui dépend de l'angle de diffraction θ . L'incertitude maximale sur p_x vaut donc :

$$u(p_x) = \dots$$

En utilisant la relation de diffraction : $\sin \theta = \dots$

Or la relation de DeBroglie donne : $\Delta x \approx \dots$

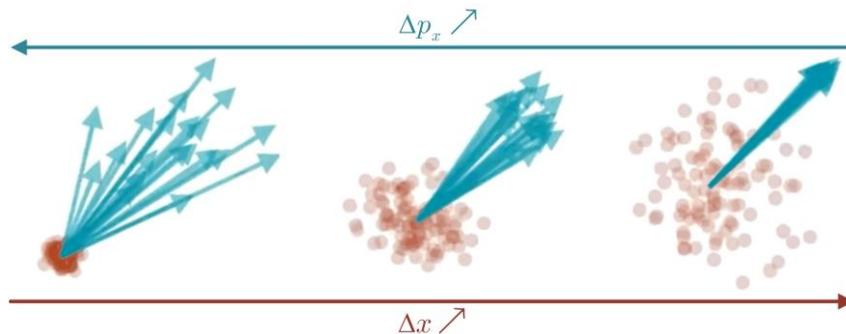
La multiplication des incertitudes de position et d'impulsion du photon est une
 Par conséquent, Δx et Δp_x ne peuvent pas être même en théorie.

Du point de vue corpusculaire, plus on restreint le photon à passer par un petit trou et plus il sera difficile de savoir A l'inverse, plus le trou sera grand, plus on saura où va le photon, il ira tout droit, mais moins on saura s'il est passé près ou loin du centre du trou. L'expression plus générale est une inégalité dite d'Heisenberg :



où \hbar est la constante de Planck réduite définie page 4

Il n'est pas possible de mesurer aussi précisément la position et la quantité de mouvement d'une particule. Les efforts de précision pour mesurer l'une vont engendrer des difficultés et des incertitudes à mesurer l'autre. Comme un animal enragé que l'on veut maintenir en cage, sa position sera bien connue puisqu'il sera prisonnier mais son mouvement sera difficilement prédictible puisqu'il sera énervé par le manque d'espace et de liberté.



Les particules de matière n'ont pas, soit on considère leurs vitesses et on s'intéresse à leurs trajectoires corpusculaires comme en mécanique classique ou en optique géométrique avec les rayons lumineux, soit on considère leurs positions et on s'intéresse à leurs probabilités de présence par leur aspect ondulatoire avec $\psi(x, t)$.

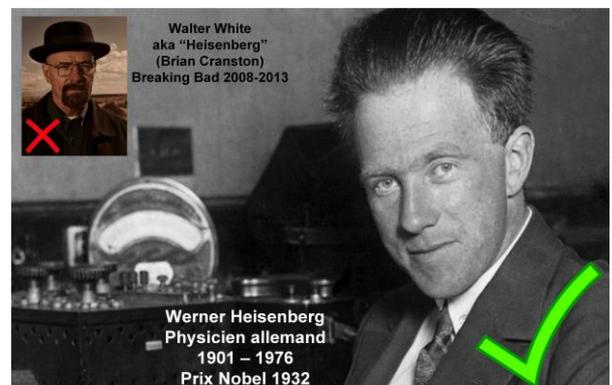
🧐 Culture scientifique :

L'inégalité d'Heisenberg est souvent appelée "principe d'incertitude" mais cette expression mal traduite est doublement incorrecte.

1) Un principe n'est pas censé être démontrable or l'inégalité d'Heisenberg se démontre avec les opérateurs de la mécanique quantique.

2) Heisenberg a lui-même reconnu dès 1927 que les termes d'"incertitude" ou d'"imprécision"

pour définir cette inégalité laissait penser qu'il s'agissait d'un problème expérimental où le manque de connaissances technologiques empêchait de le résoudre or le problème n'est pas le système de mesure mais bien le fait que les particules ont un caractère indomptable.



III . Modèle planétaire de Bohr

Soit un atome d'hydrogène modélisé par un électron de masse m , de charge $q_e = -e$ en mouvement autour d'un proton fixe de masse $m_p \gg m$ et de charge $q_p = +e$.

L'électron est assimilé à un point M , le proton est assimilé au point origine O .

A . Postulats de Bohr (1913)

En juillet 1913, Niels Bohr (1885 – 1962) propose un nouveau modèle de l'atome.

➤ *1^{ère} hypothèse* : L'électron est en orbite de rayon r autour du proton.

Salviati : On pourrait remplacer r par R puisque $r = cste$ mais personne ne le fait.

L'électron pouvant être considéré comme une onde de matière, lorsqu'il a fait le tour de son orbite autour du proton, il doit être avec lui-même *i.e.* il doit interférer avec lui-même de façon *i.e.* le chemin parcouru à savoir le périmètre du cercle doit être un : où $n \in \mathbb{N}^*$, entier naturel non nul.

$$\text{D'après la relation de De Broglie, } \lambda = \frac{h}{mv} \Leftrightarrow p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

Pour un mouvement circulaire, d'après la page 5 du chapitre V de mécanique, la norme du moment cinétique vaut : $L =$ car $\overline{OM} \parallel \vec{v}(M)$ avec $\vec{L} = \overline{OM} \wedge \vec{p}(M)$.

...

➤ *2^{ème} hypothèse* : Le moment cinétique est un, il est donc

Salviati : La quantification du moment cinétique de Bohr et la quantification de la lumière par des photons de Planck sont à l'origine du nom de ce domaine des sciences physiques.

B . Propriétés du mouvement

La quantification du moment cinétique de l'électron va entraîner la quantification de toutes les autres grandeurs qui le caractérisent : sa position, sa vitesse et son énergie.

➤ En coordonnées polaires, $\overline{OM} = \vec{r} = r\vec{e}_r$ (mouvement circulaire $r = cste$) d'où :

$$\vec{v}(M) = r\dot{\theta}\vec{e}_\theta \text{ (vitesse de l'électron) et } \vec{a}(M) = -r\dot{\theta}^2\vec{e}_r + r\ddot{\theta}\vec{e}_\theta \text{ (accélération de l'électron)}$$

L'électron n'est soumis qu'à la force électrostatique du proton : $\vec{F}(M) =$

➤ 2^{ème} loi de Newton : $\frac{d\vec{p}(M)}{dt} = \vec{F}(M) \Leftrightarrow$ d'où :



(équations polaires du mouvement de l'électron)

➤ La 2^{ème} équation polaire conduit donc à $\ddot{\theta} = 0 \Rightarrow \dot{\theta} = cste \Rightarrow \boxed{v = r|\dot{\theta}| = cste}$

Le mouvement est donc circulaire et

Le moment cinétique s'écrit : $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p} =$

Le moment cinétique de l'électron est constant

C . Quantification des grandeurs

➤ La 1^{ère} équation polaire donne $\dot{\theta}^2 =$ avec $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

D'après l'hypothèse de Bohr, $L = \dots, n \in \mathbb{N}^*$ et d'après les calculs, $L =$

En passant au carré : $L^2 =$ d'où :

$$\Leftrightarrow \boxed{\hspace{10em}} \Leftrightarrow \text{car } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

A.N. $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \approx \dots \text{ pm}$, c'est le, noté abusivement r_0 ou a_0 .

Données : $m_e = 9,109.10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1,602.10^{-19} \text{ C}$, $h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$, $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

Il y a **quantification** du rayon de l'électron.

➤ D'après l'expression du moment cinétique, $L =$ donc :

...

A.N. $v_1 = \dots \approx \dots \text{ m.s}^{-1}$

Il y a **quantification** de la vitesse de l'électron. $v_1 \approx 0,7\%$ de c .

La vitesse étant faible devant c , on peut ne pas tenir compte de la relativité restreinte.

D . Quantification des énergies

D'après le chapitre IV page 4 de mécanique, $\vec{F} =$ et $E_{PE} =$

On suppose que très loin du proton, l'influence de la force sur l'électron est nulle.

L'énergie cinétique s'écrit : $E_C = \frac{1}{2}mv^2 =$

➤ La 1^{ère} équation polaire donne $mr\dot{\theta}^2 =$ d'où :

$E_C =$ (lien entre énergies)

La vitesse étant quantifiée et les énergies étant proportionnelles entre elles, toutes les énergies cinétique, potentielle et mécanique sont aussi

➤ L'énergie mécanique de l'électron s'écrit : $E = E_C + E_P =$ d'où :

...

➤ L'énergie mécanique de l'électron s'écrit aussi : $E = E_C + E_P =$ d'où :

...

avec $E_1 = \approx -\dots\dots\dots 10^{-18} \times 10^{-18} \approx$ eV, énergie de l'état fondamental

Il y a **quantification** de l'énergie de l'électron.

$$E_2 = \frac{E_1}{\dots}, E_3 = \frac{E_1}{\dots}, \text{etc...}$$

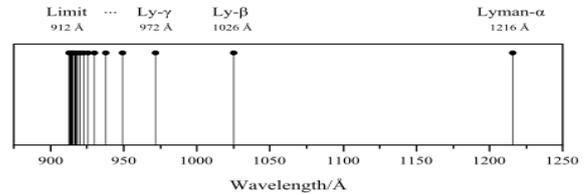
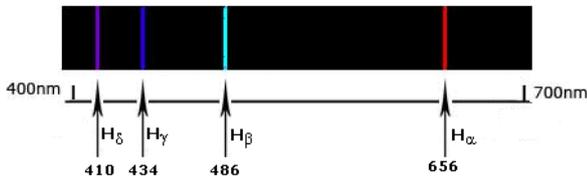
$n \nearrow \Rightarrow$

Une énergie est cohérente avec la mécanique classique d'une particule soumise à une force centrale, cela correspond bien à un **état** *i.e.* un état où l'électron est en orbite circulaire ou elliptique (Mécanique chapitre VI page 7). Plus n devient grand, plus on se rapproche d'un **état de** où l'électron est libéré de l'atome.

L'énergie E_1 de l'état **fondamental** correspond à l'état **stable** de l'électron.

Les autres énergies correspondent à des états **excités** de l'électron.

En 1885, Balmer excite des atomes d'hydrogène qui émettent 4 raies monochromatiques dans le domaine visible (410, 434, 486, 656 nm). En 1906, Lyman reproduit l'expérience et observe d'autres raies dans le domaine des proches UV (92, 97, 102, 121 nm).



L'électron est excité par une décharge électrique ou une radiation lumineuse en passant d'un niveau d'énergie m à un niveau d'énergie $n > m$ puis se désexcite en passant du niveau d'énergie n au niveau d'énergie m . En se désexcitant, l'électron perd une énergie ΔE émise sous forme d'une radiation lumineuse *i.e.* d'un photon telle que :

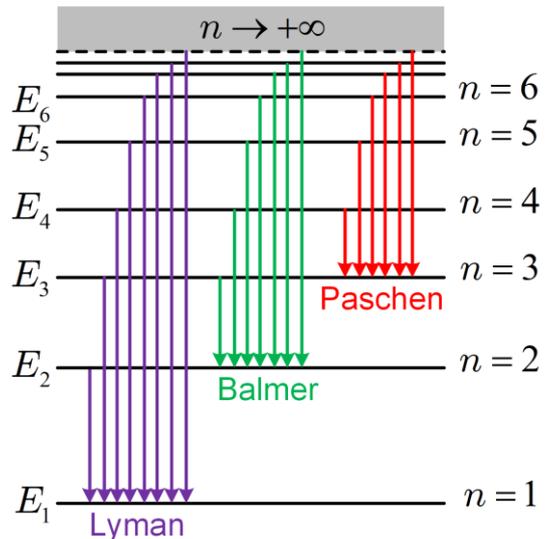
$$\Delta E = E_n - E_m = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (m < n)$$

En se désexcitant, il libère naturellement un photon d'énergie ΔE ($m, n \in \mathbb{N}^*$).

$$\Delta E = \frac{E_1}{n^2} - \frac{E_1}{m^2} = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{R_H}{m^2} - \frac{R_H}{n^2} \quad \text{car } E_1 < 0$$

Bien que découverte plus tard, la série de est celle qui ramène les e^- à l'état fondamental.

Le schéma ci-contre pas du tout à l'échelle montrent que les transitions électroniques d'un niveau à un autre sont plus énergétiques dans le cas de la série de Les énergies de transition étant plus grandes, les photons émis auront une fréquence plus grande et une longueur d'onde plus



La série de émet dans l'UV alors que celle de Paschen émet dans

Culture scientifique :

Tout comme Descartes n'a jamais écrit la 2^{ème} loi de la réfraction sous forme de sinus et Newton n'a jamais écrit sa 2^{ème} loi sous forme de vecteurs, Bohr n'a jamais écrit $L = n\hbar$ mais $M = \tau M_0$ où toutes les lettres correspondent dans le même ordre.

Einstein non plus n'a pas écrit $E = mc^2$ en septembre 1905 mais $K_0 - K_1 = \frac{1}{2} \frac{L}{c^2} v^2$.

Table des matières

I . Particule de lumière.....	1
A . Effet photoélectrique (1900)	2
B . Energie et impulsion	3
1 . Un peu de relativité restreinte (1905)	3
2 . Relation de De Broglie (1924)	4
II . Dualité onde-corpuscule	5
A . Onde de matière	5
B . Inégalité spatiale d'Heisenberg (1927).....	6
III . Modèle planétaire de Bohr	9
A . Postulats de Bohr (1913)	9
B . Propriétés du mouvement	9
C . Quantification des grandeurs	10
D . Quantification des énergies.....	11
Table des matières.....	13