

Chapitre 31 : Introduction à la physique quantique

1 Émergence de la physique quantique

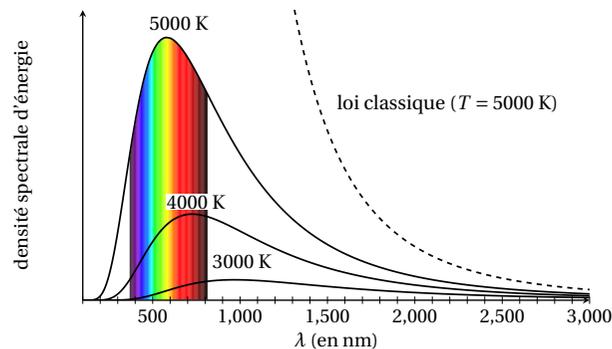
1.1 Introduction

La physique quantique est le domaine de la physique qui étudie le comportement des systèmes microscopiques, des constituants d'un noyau atomique jusqu'aux macromolécules. C'est une science très récente puisqu'elle n'a vu le jour qu'au début du XX^e siècle. Elle a comblé un vide dans la compréhension de la matière, laissé par la physique dite "classique", celle qui permet de comprendre le monde à l'échelle macroscopique. Aujourd'hui, la physique quantique constitue un outil indispensable pour étudier les propriétés de la matière. Ses applications sont innombrables (lasers, DEL, microélectronique, cryptographie, radioactivité, imagerie,...) et les perspectives d'innovations sont encore nombreuses pour les années à venir.

La naissance de la mécanique quantique date de l'année 1900, lorsque le physicien Max Planck propose une idée originale pour expliquer un phénomène qui met les théories scientifiques de l'époque en défaut, le **rayonnement du corps noir**.

1.2 Le rayonnement du corps noir

Tout corps porté à une température différente du zéro absolu émet par *rayonnement* des ondes électromagnétiques dans tout l'espace. Ce rayonnement est dû aux atomes du corps qui vibrent autour de leur position d'équilibre sous l'effet de la chaleur et se comportent comme des *oscillateurs*. Cette vibration s'accompagne de l'émission d'une onde électromagnétique et donc d'un échange d'énergie entre la matière et le rayonnement EM. La théorie de Rayleigh-Jeans, basée sur la théorie de l'électromagnétisme formalisée par Maxwell quelques décennies plus tôt, suppose que l'énergie échangée entre les oscillateurs et le champ EM peut prendre n'importe quelle valeur. Malheureusement, le spectre calculé n'est pas en accord avec les observations expérimentales dans le domaine des faibles longueurs d'onde, c'est ce qui sera appelé la *catastrophe ultraviolette*.



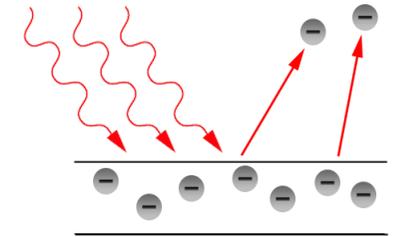
En 1900, Max Planck propose de résoudre le problème en faisant l'hypothèse suivante :

La matière ne peut échanger avec le rayonnement électromagnétique que des quanta d'énergie dont la valeur est proportionnelle à la fréquence.

Planck introduit pour la première fois dans l'histoire de la physique la notion de quantification. C'est ici l'échange d'énergie entre matière et rayonnement qui est quantifiée. Cet échange s'écrit sous la forme $\varepsilon = \text{Cste} \times \nu$ où ν est la fréquence de la radiation EM. La constante de proportionnalité prendra plus tard le nom de son géniteur, la constante de Planck h !

1.3 L'effet photoélectrique

Lorsqu'on éclaire certains matériaux avec une onde lumineuse, il est possible d'en arracher des électrons, à condition que la fréquence de l'onde lumineuse soit suffisamment grande. Ce phénomène, aujourd'hui mis à profit dans les cellules photovoltaïques ou les photomultiplicateurs, ne trouve pas d'explication si l'on considère la lumière comme une onde électromagnétique. En 1905, Einstein reprend les idées de Planck et justifie l'effet photoélectrique par l'existence de **quanta de lumière** (qui seront nommés photons un peu plus tard) dont l'énergie, comme l'avait proposé Planck, est proportionnelle à la fréquence de l'onde lumineuse.



Effet photoélectrique

L'article publié par Einstein en 1905 dans la revue *Annalen der Physik* sous le titre (en VF) : *Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* (*Annalen der Physik* 17 [1905] : 132-148) lui vaudra le prix nobel de physique en 1921. Pour l'anecdote, Einstein publia cette même année cinq articles dont la plupart contenaient des idées révolutionnaires pour l'époque, notamment deux articles portant sur la relativité restreinte. L'un de ces articles, d'à peine trois pages, contient la fameuse relation $E = mc^2$ (*L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?*, *Annalen der Physik* 18 [1905] : 639-641). Einstein ne recevra pas de prix Nobel pour cet article ni pour la théorie de la relativité restreinte et générale.

Revenons à l'effet photoélectrique. Voici un extrait de l'article d'Einstein :

La conception selon laquelle la lumière excitatrice est constituée de quanta d'énergie $(R/N_A) \beta \nu$ (comprendre $h\nu$: la constante de Planck n'existait pas encore à l'époque) permet de concevoir la production de rayons cathodiques par de la lumière de la façon suivante. Des quanta d'énergie pénètrent dans la couche superficielle du corps ; leur énergie est transformée, au moins en partie, en énergie cinétique des électrons. La représentation la plus simple que l'on puisse s'en faire est celle d'un quantum de lumière cédant son énergie à un seul électron ; nous allons supposer que c'est bien ce qui se passe.[...] Nous allons supposer, de plus, que tout électron doit, pour pouvoir quitter un corps, fournir un certain travail P (caractéristique du corps). Les électrons qui quittent le corps avec la vitesse normale la plus élevée sont ceux qui se trouvent immédiatement à la surface et qui ont été excités normalement à celle-ci. L'énergie cinétique de ces électrons est :

$$\frac{R}{N_A} \beta \nu - P$$

2 Dualité onde/corpuscule

2.1 Le photon, un quantum de lumière

Avec le vocabulaire d'aujourd'hui, voici comment interpréter les idées d'Einstein. La lumière est constituée de particules appelées **photons** ayant les propriétés suivantes :

- leur masse est nulle,
- ils se déplacent exactement à la vitesse $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide,
- leur énergie est proportionnelle à la fréquence ν de la lumière :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

- il ont une quantité de mouvement :

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

Un photon de fréquence ν qui atteint la surface du corps cède toute son énergie à un électron. Pour extraire ce dernier il faut au minimum lui fournir l'énergie suffisante pour se libérer des interactions qui le maintiennent dans le corps. Cette énergie est appelée **travail d'extraction**, notée W (le P d'Einstein). Cela n'est possible que si l'énergie du photon $E \geq W$, autrement dit pour un photon dont la longueur d'onde est supérieure à une longueur d'onde seuil λ_s :

$$\lambda \leq \lambda_s = \frac{hc}{W}$$

Si un photon possède une énergie E supérieure à W , l'électron excité sera non seulement extrait du corps mais il va acquérir une énergie cinétique correspondant au surplus d'énergie reçue :

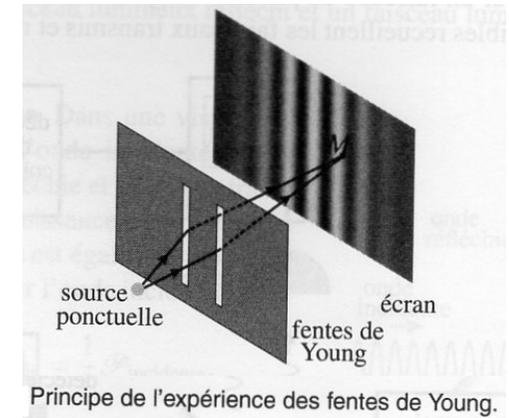
$$E_c = E - W = h\nu - W$$

Il est impossible d'interpréter tous les phénomènes liés à la lumière avec une vision purement ondulatoire ou corpusculaire. Les deux visions sont complémentaires l'une de l'autre et ne se contredisent pas l'une l'autre. Selon les expériences, on observera plutôt l'une ou l'autre de ces facettes de la lumière. C'est ce qu'on appelle la **dualité onde/corpuscule** de la lumière.

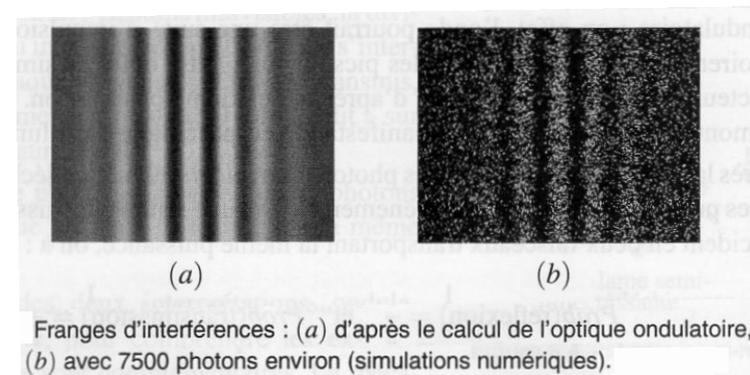
application : calcul du nombre de photons émis par une source laser.

2.2 Une expérience à la frontière entre onde et corpuscule : les fentes d'Young

Le dispositif des fentes d'Young est un classique pour mettre en évidence les interférences lumineuses. Il est composé de deux fentes parallèles très fines, éclairées par une onde lumineuse. Chaque fente, prise séparément, se comporte comme une source secondaire qui diffracte l'onde lumineuse. Mais lorsqu'elles sont éclairées ensemble par la même source, les deux fentes constituent deux sources secondaires susceptibles d'interférer entre elles. La figure d'interférence résulte en une alternance de franges claires et de franges sombres parallèles aux fentes.



L'obtention des franges d'interférences est tout à fait prévisible avec une vision ondulatoire de la lumière. Mais imaginons maintenant qu'au lieu d'éclairer les fentes avec source "classique", on l'éclaire avec un photon unique (cela est possible avec les dispositifs actuels). Comment prévoir l'évolution d'un photon qui traverse l'une des fentes ? Peut-on imaginer des interférences avec un seul photon passant dans une seule fente ? On réalise alors l'expérience suivante : on envoie une succession de photons uniques sur les fentes d'Young, chaque photon passant soit dans une fente, soit dans l'autre et on observe la position des photons derrière les fentes avec un capteur CCD sensible à des photons uniques. L'expérience montre que les photons semblent frapper le capteur **de manière aléatoire** mais que si le nombre de photons devient important, on voit se dessiner l'allure des franges d'interférences prévues par la théorie ondulatoire!



Franges d'interférences : (a) d'après le calcul de l'optique ondulatoire, (b) avec 7500 photons environ (simulations numériques).

Le comportement d'un photon unique est **probabiliste**. Il a une certaine probabilité d'atteindre un point de l'écran. Dans la limite des grands nombres, le comportement quantique du photon se confond avec le comportement prévu par la théorie classique.

2.3 Comportement ondulatoire de la matière

2.3.1 Le postulat de de Broglie

De même que la lumière, qui semblait onde, est devenue également corpuscule, la matière, de nature à priori corpusculaire, peut-elle se comporter dans certaines conditions comme une onde? C'est le postulat formulé en 1923 par le français Louis de Broglie (prononcer "de breuille"), qui associe à chaque particule une **onde de matière** dont la longueur d'onde est donné par la relation:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

Où p est la quantité de mouvement (ou impulsion) de la particule. Cette relation est appelée **relation de de Broglie** et la longueur d'onde associée **longueur d'onde de de Broglie** de la particule.

2.3.2 L'expérience de Davisson et Germer

La première vérification expérimentale de la prévision de de Broglie a lieu en 1927. Elle est conduite par C.J. Davisson et L. Germer et consiste à faire diffracter des électrons à travers un monocristal de nickel. A l'époque, on sait qu'un cristal est capable de diffracter une onde si sa longueur d'onde est de l'ordre de grandeur de la période spatiale du cristal. Des figures de diffraction à travers des cristaux ont déjà été obtenues expérimentalement avec des rayons X, dont la longueur d'onde est de l'ordre de 0,1 nm. La figure de diffraction électronique obtenue par Davisson et Germer correspond exactement à celle obtenue avec des rayons X ayant la même longueur d'onde que celle prévue par de Broglie.

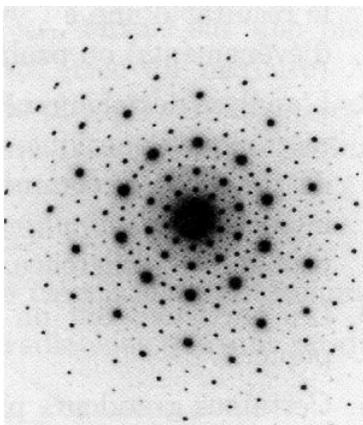
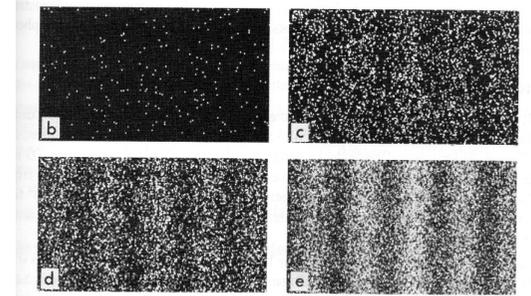
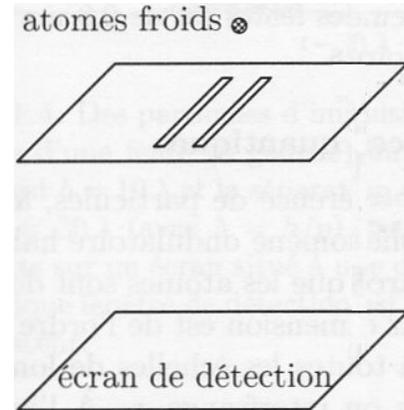


Figure de diffraction d'électrons à travers un cristal fait d'un alliage Al Mn Si

2.3.3 Interférences de particules

Une expérience similaire à celle des fentes d'Young peut être réalisée avec des atomes froids (température de l'ordre du millikelvin). On fait chuter des atomes de néon sur un écran percé de deux fentes parallèles et on observe la position des atomes qui sont passés par l'une des fentes sur un écran. Le dispositif permet de représenter le point d'impact de chaque atome par un point lumineux. On constate que le comportement des atomes est de même nature que celui des photons uniques dans l'expérience des fentes d'Young. Les atomes semblent frapper l'écran de manière aléatoire mais pour un grand nombre d'atomes, on voit que certaines portions de l'écran ont plus de chance d'être frappées que d'autre. La figure obtenue correspond à une figure d'interférence entre deux ondes cohérentes.



Construction progressive d'une figure d'interférences d'atomes. Chaque point lumineux correspond à l'arrivée d'un atome. Nombre d'atomes respectifs sur les images (b), (c), (d) et (e) : 100, 3000, 20000 et 70000

La matière, comme la lumière, peut se comporter de manière ondulatoire. Si l'on regarde le comportement d'une particule unique, on constate qu'il est de nature probabiliste. La mécanique quantique doit prendre en compte cet aspect probabiliste si elle veut décrire l'évolution d'une particule quantique dans le temps et l'espace. C'est le rôle joué par la **fonction d'onde**.

3 Fonction d'onde d'un système quantique

3.1 Définition

Toute l'information concernant un système quantique est contenue dans une fonction complexe du temps et de l'espace appelée **fonction d'onde**, notée $\psi(M, t)$.

Contrairement à un système macroscopique dont connaît sans ambiguïté la position $\vec{r}(t)$ dans l'espace, on caractérise un système quantique par la probabilité qu'il se trouve en un point M de l'espace à une date t.

Pour simplifier les choses, nous allons considérer une particule quantique en mouvement 1D sur un axe (Ox). La fonction d'onde associée à cette particule sera notée $\psi(x, t)$.

3.2 Probabilité de présence

La probabilité *infinitésimale* que la particule se trouve entre les abscisses x et $x + dx$ s'écrit :

$$d\mathcal{P} = |\psi(x, t)|^2 dx$$

Remarques :

- $|\psi(x, t)|^2$ représente une *densité de probabilité* pour la particule, en un point d'abscisse x , à un instant t .
- On donne généralement à $\psi(x, t)$ le nom d'*amplitude de probabilité*.

Conséquences :

- La probabilité pour que la particule se trouve entre deux points d'abscisses x_1 et x_2 s'écrit :

$$\mathcal{P}(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x, t)|^2 dx$$

- Puisque la particule se trouve forcément quelque part sur l'axe (Ox), la fonction d'onde vérifie nécessairement la *relation de normalisation* suivante :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

3.3 Interprétation probabiliste de l'expérience des fentes d'Young

Dans l'expérience des fentes d'Young, les franges d'interférences viennent de la présence simultanée de deux fentes qui jouent le rôle de sources cohérentes. Chaque fente, si elle était seule, donnerait une figure de diffraction "classique". Appelons les *fente 1* et *fente 2*. On note ψ_1 (respectivement ψ_2) la fonction d'onde associée à une particule traversant la fente 1 (respectivement fente 2), *seule*. On peut montrer que la fonction d'onde obéit au **principe de superposition**. La fonction d'onde qui caractérise la situation {fente 1 + fente 2} est égale à la somme des fonctions d'ondes pour chaque fente supposée seule, c'est-à-dire :

$$\psi(M, t) = \psi_1(M, t) + \psi_2(M, t)$$

On dit que la particule est dans une superposition des états {fente 1 seule} et {fente 2 seule}. On montre alors que la probabilité de présence de la particule derrière les fentes n'est **pas** la somme des probabilités pour chaque fente prise seule. Les fonctions d'ondes **interfèrent entre elles** et donnent naissance à la figure d'interférence observée à l'écran.

$$|\psi(M, t)|^2 \neq |\psi_1(M, t)|^2 + |\psi_2(M, t)|^2$$

4 Inégalité de Heisenberg

4.1 Dispersion quantique

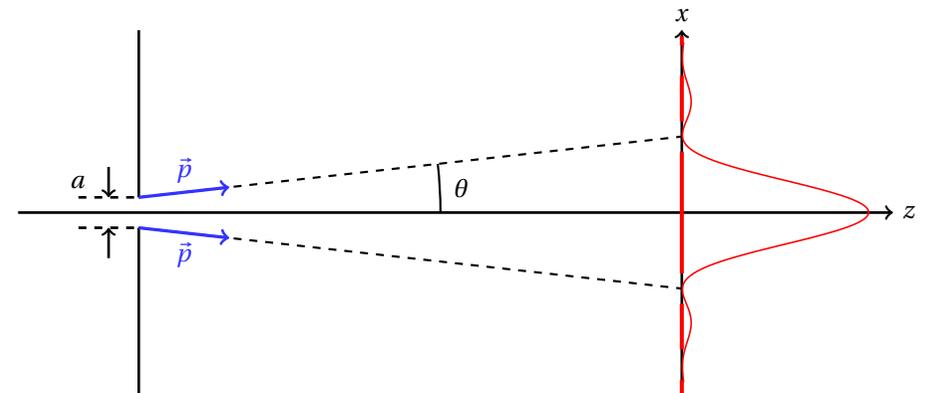
Comme on l'a vu dans l'expérience des fentes d'Young, le résultat d'un mesurage sur un système quantique est aléatoire.

Si l'on prépare une infinité de particules dans le même état quantique et qu'on leur fait subir une évolution, la mesure d'une grandeur physique X associée à une particule (position, impulsion, énergie,...) suit une distribution caractérisée notamment par sa moyenne $\langle X \rangle$ et son écart-type $\Delta X = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}$.

ΔX caractérise la dispersion des résultats possibles pour le mesurage de la grandeur X .

4.2 Cas de la diffraction par un fente

On considère un flux de particules massives identiques qui se dirigent sur une fente de largeur a avec une quantité de mouvement $\vec{p} = p\vec{u}_z$. Ces particules se comportent comme une onde de longueur d'onde $\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$ et se diffractent à travers la fente.



On s'intéresse aux particules qui forment la tâche centrale. Si l'on mesure les positions x de ces particules juste derrière la fente ainsi que la projection de leur impulsion selon la verticale p_x , on peut montrer que la dispersion de ces valeurs vérifie la relation :

$$\Delta x \Delta p_x \sim h$$

Si l'on cherche à localiser des particules dans une certaine portion de l'espace (avec une fente par exemple), il en résulte inévitablement une dispersion de leur impulsion.

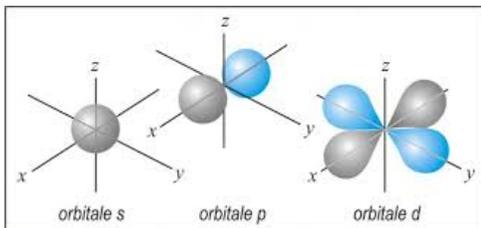
4.3 Inégalité de Heisenberg spatiale

Le résultat précédent se généralise à toute situation physique, sous la forme d'une inégalité appelée **inégalité de Heisenberg spatiale** et qui s'écrit sous la forme :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$$

où $\hbar = h/2\pi$ est la constante de Planck réduite. Cette inégalité est une propriété fondamentale de la nature, qui peut s'interpréter de la manière suivante. Si l'on confine une particule dans une certaine portion de l'espace, alors il n'est pas possible de lui imposer une impulsion particulière. Celle-ci est inévitablement dispersée sur un intervalle $\Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2\Delta x}$. De manière symétrique, si l'on prépare une particule de manière à connaître avec précision sa vitesse (donc son impulsion), alors il est impossible de connaître avec certitude sa position.

Une conséquence importante de cette indétermination est qu'au niveau microscopique, il est impossible de connaître en même temps et avec exactitude la position et la vitesse d'une particule. Cela implique qu'il faut abandonner la notion classique de trajectoire d'une particule. Elle n'a de sens qu'au niveau macroscopique, pour lequel les effets de l'inégalité de Heisenberg sont négligeables.



Un exemple concret est le comportement des électrons de valence d'un atome. Ils ne sont pas décrit par leur trajectoire autour de l'atome mais par des *orbitales atomiques*, c'est-à-dire des zones 3D dans lesquelles elles ont une certaine probabilité de se trouver. La forme des orbitales atomiques dépend de plusieurs nombres quantiques (voir programme de chimie). En voici quelques exemples ci-dessus.

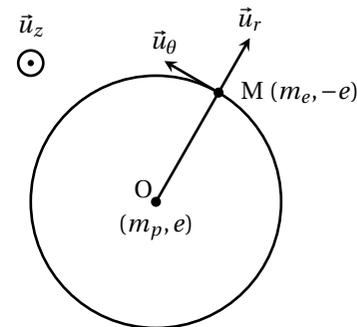
5 Quantification de l'énergie d'une particule

5.1 Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène

Au tournant du XX^{ème} siècle, plusieurs découvertes permirent de mieux comprendre la structure de la matière et notamment celle des atomes, dont l'existence était soupçonnée depuis longtemps.

- En 1897, Thomson découvrit l'électron,
- en 1906, Jean Perrin apporta la preuve de l'existence des atomes,
- en 1909, Rutherford découvrit le noyau et établit un premier modèle planétaire de l'atome.

Cependant, le modèle de Rutherford ne permettait pas d'expliquer l'existence de raies dans le spectre d'émission des éléments chimiques. Le physicien danois Niels Bohr voulu construire un modèle d'atome d'hydrogène qui soit cohérent avec son spectre d'émission, dont on connaît la composition spectrale depuis 1888 et les travaux de Rydberg et Ritz. Bohr avait lu les travaux de Planck et d'Einstein sur la quantification de l'énergie et proposa en 1913 le modèle suivant :



L'atome d'hydrogène est constitué d'un noyau supposé ponctuel et fixe, de charge électrique positive $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C, autour duquel gravite un électron de charge $-e$ et de masse $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, sur une orbite circulaire de rayon R .

Le moment cinétique \vec{L} de l'électron par rapport au noyau est quantifié, il ne peut prendre que les valeurs suivantes :

$$\|\vec{L}_n\| = n\hbar$$

où $\hbar = h/2\pi$ est la constante de Planck réduite et n un entier naturel non nul.

Ce modèle, qui utilise les lois de la mécanique classique avec un "ingrédient" quantique, est appelé **semi-classique**. Il prévoit que l'énergie de l'électron est quantifiée selon la loi :

$$E_n = -\frac{\mathcal{E}}{n^2}$$

avec

$$\mathcal{E} = \frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} = 13,6 \text{ eV}$$

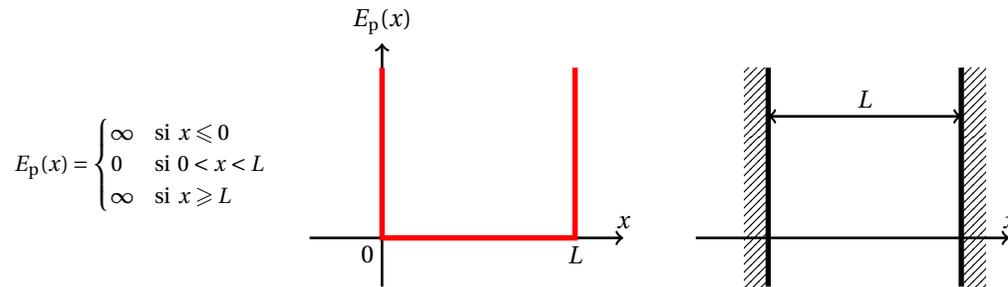
Le modèle de Bohr est compatible avec le spectre d'émission de l'hydrogène! C'est un succès formidable qui laisse entrevoir que la théorie quantique a un rôle à jouer dans l'explication des propriétés de la matière au niveau microscopique. Pourtant, tout n'est pas si simple car ce modèle possède un grave défaut : il mène à la conclusion que la matière est instable! En effet, les lois de l'électromagnétisme indiquent qu'un électron qui suivrait un tel mouvement circulaire devrait perdre de l'énergie par rayonnement électromagnétique, ce qui le conduirait inévitablement à s'effondrer sur le noyau en un temps extrêmement court!

Il fallut attendre quelques années, abandonner la notion de trajectoire d'une particule élémentaire et la remplacer par celle de fonction d'onde pour arriver enfin à une explication satisfaisante de la stabilité de la matière.

Le modèle de Bohr, malgré ses défauts, fut une étape décisive dans l'élaboration de la théorie quantique, au même titre que l'hypothèse de Planck ou celle d'Einstein. D'ailleurs, il permit à Bohr d'être récompensé du prix Nobel en 1922. Aujourd'hui encore, Bohr est considéré comme l'un des artisans majeur de la construction de la théorie quantique. Il est notamment réputé pour avoir mené une controverse avec Einstein, longue de plusieurs dizaines d'années, sur l'interprétation probabiliste des expériences quantiques. Cette controverse est encore d'actualité aujourd'hui mais toutes les expériences qui ont été réalisées jusqu'à ce jour (dont les fameuses expériences d'Alain Aspect à propos des inégalités de Bell) tendent à prouver que c'est Bohr qui avait raison.

5.2 Puits de potentiel infini à 1 dimension

On appelle puits infini à une dimension un système soumis à des actions extérieures dont l'énergie potentielle $E_p(x)$ a la forme suivante :



Un puits de potentiel infini correspond à une particule libre confinée entre les abscisses $x = 0$ et $x = L$.

Par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante fixée entre ses extrémités, l'onde de matière associée à la particule est une **onde stationnaire**. De plus, les conditions aux limites fixent deux noeuds de l'onde stationnaire en $x = 0$ et $x = L$. Les longueurs d'ondes λ_{dB} d'une particule confinée sont quantifiées. D'après la relation de de Broglie, leur énergie est elle aussi quantifiée. On peut montrer que les "modes propres" de la particule sont caractérisés par :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n \in \mathbb{N}^*$$

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2} \quad n \in \mathbb{N}^*$$

5.3 Transition entre deux niveaux d'énergie

Une particule qui subit une transition entre un niveau d'énergie n et un niveau d'énergie p le fait en absorbant ou en émettant un photon vérifiant la conservation de l'énergie totale. Ainsi, à chaque transition entre deux niveaux d'énergie correspond une radiation électromagnétique de longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{hc}{E_p - E_n}$$

Ce phénomène est à l'origine du spectre d'émission et d'absorption des espèces chimiques ou de la production d'un faisceau laser (principe de l'émission spontanée et stimulée).

5.4 Lien entre confinement spatial et quantification

Les résultats obtenus dans le cas du puits infini se généralisent à n'importe quel système quantique.

Une particule quantique confinée dans une région de l'espace de taille finie a une énergie quantifiée.

Mécanique quantique et physique des particules : des personnages et des dates

- 1897 : découverte de l'électron par Thomson,
- 1900 : première formulation de la quantification de l'énergie par Max Planck à propos du corps noir,
- 1905 : Einstein prévoit l'existence des photons pour expliquer l'effet photoélectrique,
- 1906 : mise en évidence expérimentale de l'existence des atomes par Jean Perrin (suivant une idée proposée par Einstein concernant le mouvement brownien),
- 1911 : découverte du proton par Rutherford,
- 1913 : premier modèle semi-quantique de l'atome d'hydrogène par Bohr,
- 1914 : Franck et Hertz observent pour la première fois la transition entre deux niveaux énergétiques dans des atomes de mercure. La fréquence du rayonnement émis est en parfait accord avec $h\nu$. (prix nobel 1925 pour cette découverte),
- 1923 : postulat de de Broglie sur la dualité onde/corpuscule de la matière,
- 1923 : vérification expérimentale de l'existence du photon par Compton,
- 1925 : Schrödinger propose une équation pour déterminer le comportement d'une onde de matière,
- 1925 : Pauli propose son principe d'exclusion,
- 1927 : expérience de Davisson et Germer,
- 1928 : Dirac étend l'équation de Schrödinger aux particules relativistes. Il prévoit par la même occasion l'existence de l'antimatière,
- 1929 : première fission stimulée en laboratoire par Cockroft et Walton (prix nobel 1951). Le bilan énergétique est en parfait accord avec $E = mc^2$,
- 1932 : découverte du neutron par Irène et Frédéric Joliot-Curie puis Chadwick.
- 1933 : Anderson observe pour la première fois une antiparticule : le positron,
- 1936 : Bohr propose un modèle quantique pour expliquer la fission des noyaux lourds,
- 1955 : découverte de l'antiproton,
- 1956 : découverte de l'antineutron,
- 1997 : le français Claude Cohen-Tannoudji reçoit le prix Nobel de physique pour ses travaux sur le refroidissement laser d'atomes qui a rendu possible les expériences d'interférences de matière et a grandement amélioré la précision des horloges atomiques.
- 2012 : découverte du boson de Higgs au CERN de Genève (prix Nobel 2013 pour François Englert et Peter Higgs).
- 2012 : le français Serge Haroche reçoit le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'observation non destructive de photons uniques.