

La mécanique quantique ? Un vrai carnage. Je n'ai pu sauver que moi. Et le saucisson
–Eric et Ramzy

1 Introduction qualitative

La physique que vous avez étudiée dans votre vie a toujours consisté en une physique d'objets qui ont un comportement que l'on pourrait qualifier de "classique". Cela signifie juste que le comportement de l'objet est, disons, intuitif. Quand une planète tourne autour du soleil, quand un glaçon fond au soleil, quand vous étudiez l'eau qui jaillit d'une fontaine, vous comprenez bien ce qui se passe.

Ici, on va donner une introduction à ce que l'on appelle la physique quantique. C'est la physique à une très petite échelle. À l'échelle atomique, voire en dessous, les objets ne se comportent en rien comme votre expérience de la vie de tous les jours.

1.1 effet photoélectrique

Newton a passé sa vie à penser que la lumière était constituée de petites particules. Un peu plus tard, des gens ont découvert que la lumière se comportait comme une onde. Vous l'avez vu plus tôt dans l'année, avec la diffraction.

Encore plus tard, les gens ont découvert que la lumière se comportait parfois comme une particule.

En 1839, Antoine Becquerel fit l'expérience suivante :

On dispose d'une photodiode (disons une plaque avec des atomes) immergée dans un liquide. Cette photodiode est reliée à un circuit électrique, et l'électrode à l'autre bout du circuit est aussi immergée dans le liquide. Lorsque la photodiode est soumise à la lumière, on mesure un courant de la photodiode à l'électrode. Becquerel en déduisit que la lumière arrache des électrons à la photodiode, électrons qui migreront ensuite vers l'électrode.

Comment est-ce que l'électron est éjecté ? La réponse est simple : la lumière incidente apporte de l'énergie (c'est pour ça qu'un panneau solaire permet de fournir de l'énergie). Quand l'électron est soumis à cette lumière, il gagne donc de l'énergie. Il s'excite. Quand il est très excité, il arrive à briser son lien avec le noyau, et il part du noyau. Dans une théorie ondulatoire de la lumière donc, si j'éclaire avec une lumière suffisamment forte, peu importe sa couleur, je peux exciter l'électron et provoquer donc un petit courant électrique.

Cependant, si on effectue l'expérience pour des lumières de longueurs d'onde très grandes (donc plutôt vers l'infrarouge), les électrons ne sont jamais excités, peu importe l'intensité de la lumière !

Il y a donc anguille sous roche...

Albert Einstein a résolu le problème en 1905 en proposant que la lumière arrive par petits paquets, chaque paquet étant appelé un photon. Un photon a une énergie définie, qui ne dépend que de sa longueur d'onde, et les expériences montrèrent que cette énergie était proportionnelle à la longueur d'onde :

$$E = h\nu \quad (1)$$

On comprend alors le phénomène photoélectrique. Quand votre photon arrive, s'il contient suffisamment d'énergie, il est absorbé par l'électron qui l'utilise pour s'exciter et s'extraire de l'attraction du noyau. Cependant, si le photon qui arrive a peu d'énergie, alors l'électron ne peut pas s'exciter suffisamment pour s'éloigner de l'atome, et donc ne va pas absorber le photon.

Aujourd'hui, on considère que la lumière se comporte un peu comme les deux, c'est ce que l'on appelle la **dualité onde-corpuscule**.

1.2 petit plongeon dans l'atome

Examinons les électrons autour d'un atome. Si les photons arrivent avec des énergies quantifiées, et que seuls certains quanta donnés permettent d'exciter les électrons, alors cela veut dire que les électrons ne peuvent pas être excités de manière continue. Ils ont des paliers donnés d'excitation, et passent de l'un à l'autre lorsqu'on leur fournit des quantités données d'énergie.

On peut représenter cela avec les schémas suivants :

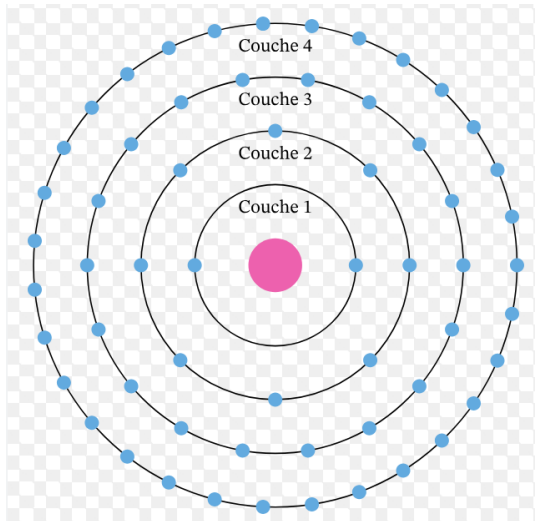


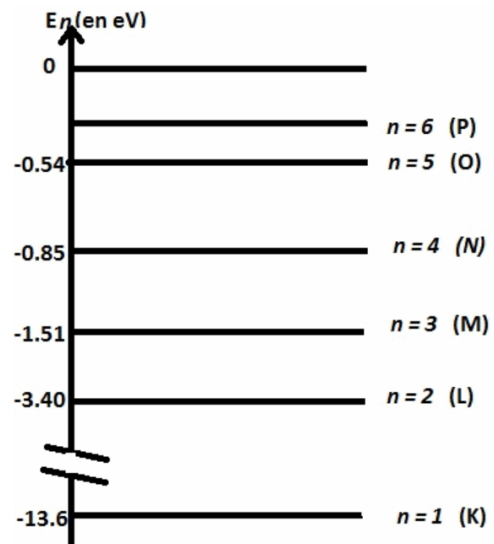
Figure 1 – un atome.

les niveaux d'énergies ont des valeurs données par l'expression

$$E = -\frac{13,6\text{eV}}{n^2} \quad (2)$$

où n est appelé le **nombre quantique principal**, et est un entier qui désigne le niveau de la couche.

Ainsi, pour qu'un électron change de niveau, il doit émettre exactement la bonne énergie (puisque l'énergie est conservée), et donc émettre un photon de fréquence bien fixée. Donc, à chaque transition entre deux niveaux, une fréquence d'émission correspond, soit une couleur.



Ainsi, en observant l'émission spontanée d'un atome, nous pouvons déterminer les différences d'énergie entre les niveaux. On regroupe ces émissions dans ce que l'on appelle un spectre :

1.3 Le problème du corps noir

Un problème qui se posait à la fin du XIX^{ème} siècle porte le nom de catastrophe ultraviolette. Le pitch était le suivant :

en 1896, Wien aboutit à **la loi de Wien**, qui stipule que pour un **corps noir** (un corps qui absorbe parfaitement la lumière et la réémet sous forme de rayonnement), le domaine lumineux dans lequel il émet le plus est inversement proportionnel à la température :

Propriété 1 : Loi de Wien

$\lambda_{max} = \sigma_w / T$ où $\sigma_w = 2,89777291 \times 10^{-3} m \cdot K$ est la constante de Wien.

A partir de cette relation, on démontra la relation de Rayleigh-Jeans, qui stipule que l'énergie émise est proportionnelle à la température et inversement proportionnel à la longueur d'onde à la puissance 4 :

L_λ est appelé la **luminance spectrale** et désigne la puissance par unité de surface et par longueur d'onde du rayonnement

Propriété 2 : Loi de Rayleigh-Jeans

$$L_\lambda = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$$

Mais dans ce cas, pour des fréquences élevés, la longueur d'onde tend vers 0 donc la puissance tend vers l'infini...

Ce problème a de nouveau été résolu en proposant que la lumière ne pouvait être émise que par petits paquets, appelés quantas. Cette fois-ci, c'est Planck qui proposa cette hypothèse.

Elle permet de trouver une énergie émise par un corps noir qui soit finie, suivant la loi de Stefan Boltzmann :

M est appelé la **exitance** et désigne la puissance par unité de surface du rayonnement

Propriété 3 : Loi de Stefan-Boltzmann

$M = \sigma T^4$ où $\sigma = 5,670374 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$ est la constante de Stefan-Boltzmann

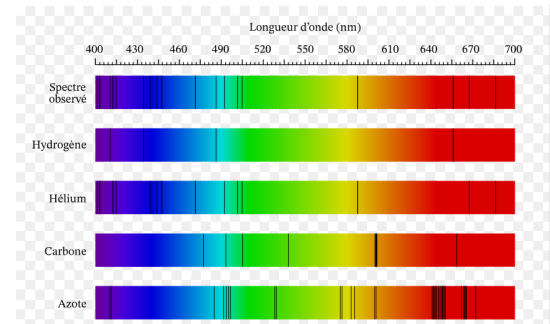


Figure 3 – Spectre d'absorption de différents atomes. Les raies noirs représentent les fréquences qui sont bien absorbées, donc les différences d'énergies entre niveaux.

1.4 caractère quantique de l'électron

Dans cette deuxième partie, nous allons voir comment un électron a aussi un comportement semblable à celui d'un photon.

On place un canon à électrons, qui tire des électrons vers un écran où il y a une fine fente. Derrière l'écran, on met un tableau qui absorbe les électrons pour nous permettre de mesurer l'endroit où les électrons arrivent.

En passant la fente, les électrons sont parfois légèrement déviés; on mesure donc sur le tableau le nombre d'électrons qui arrivent, sous la forme d'un grand trait, avec quelques petites déviations autour.

Si maintenant on dispose de deux fentes, alors on pourrait avoir le raisonnement suivant : l'électron passe soit par la fente 1, soit par la fente 2, et donc on devrait mesurer une courbe qui ressemble à la moyenne des deux courbes précédentes, soit ceci :

Cependant, expérimentalement, on obtient une figure de diffraction :

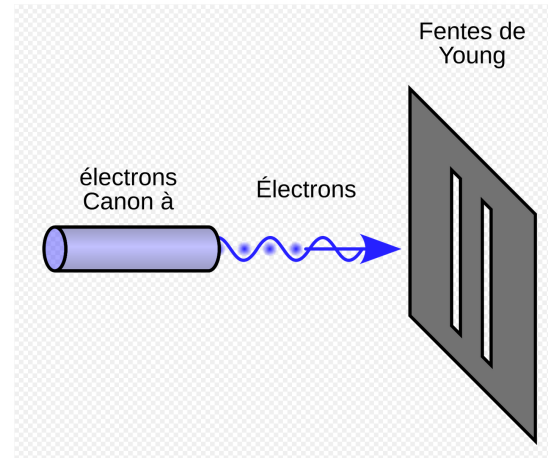


Figure 4 – Fente de Young

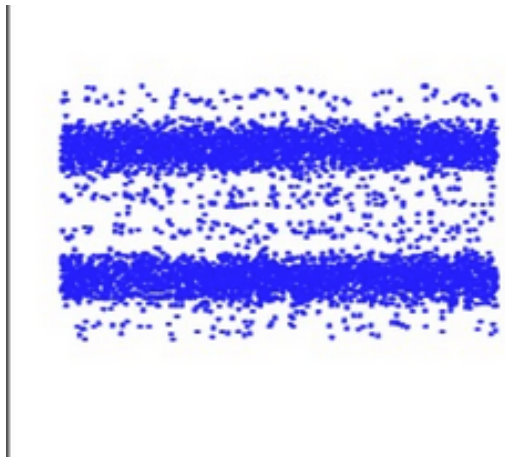


Figure 5 – Moyenne des deux courbes

Il y a des endroits où les électrons n'arrivent plus du tout, d'autres où ils arrivent alors qu'ils ne devraient pas. Comment cela est-il possible? Les électrons doivent être des ondes.

Bon, nos électrons sont des ondes. Dans ce cas, il nous faut connaître leurs caractéristiques ondulatoires. Nous voulons donc connaître la longueur d'onde λ de cette onde.

Si nous lançons un électron tout droit, la seule chose qui le caractérise est sa quantité de mouvement. En effet, sa masse, sa charge, etc., tout le reste est fixé.

Comment arriver à lier les deux? À priori, une onde n'a pas de quantité de mouvement, et une particule n'a pas de longueur d'onde.

Cependant, toutes les deux ont une énergie! Plus précisément, si nous prenons des photons plutôt que des électrons, nous avons dit précédemment que l'énergie d'un photon est $h\nu$. Or, En relativité restreinte vous avez vu que pour un photon, $E = pc$, d'où on en déduit

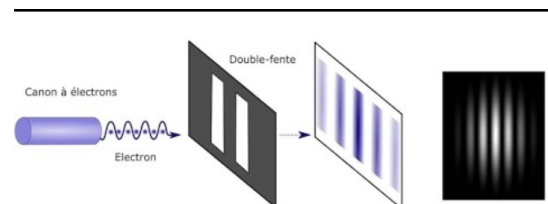


Figure 6 – Observation réel, à droite

$$p = h/\lambda \quad (3)$$

Finalement, cette relation a la forme que nous recherchons. Elle est vraie pour toutes les particules, et porte le nom de **relation de de Broglie**.

Propriété 4 : Relation de de Broglie

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

Revenons à notre expérience, et modifions-la un peu : On va éclairer les deux fentes par une source de lumière. Quand une charge passe par, elle diffuse un peu de lumière vers notre œil. Donc, à chaque fois que l'électron passe à gauche, on devrait voir un flash de lumière à gauche et idem à droite.

Expérimentalement, on peut faire cette expérience et effectivement, à chaque fois que notre tableau clic pour nous indiquer qu'il vient de mesurer un électron, on voit un flash de lumière soit à la fente 1 soit à la fente 2.

Cependant, si on effectue cette expérience, l'image que l'on voit sur le tableau change. On voit bien la superposition des densités produits par les cas où on a une seule fente (fig 5).

C'est terrible ! cela veut dire que juste le fait de regarder notre électron modifie ce que l'on voit sur le tableau.

Comment cela est-il possible ? il faut se rappeler que l'on éclaire l'électron avec des photons, qui quand il cogne l'électron lui apporte un quanta d'énergie. Mais donc la trajectoire de l'électron change car on lui apporte de l'énergie.

Très bien mais dans ce cas, en se rappelant de la formule $E = h\nu$, on peut essayer de faire diminuer E en diminuant ν , c'est à dire en éclairant avec des longueurs d'ondes très grandes. Au début, l'image ne change pas. Très bien, prenons des longueurs d'onde encore plus grande. A un moment, on se met de nouveau à voir sur le tableau des figures ressemblant à des figures d'interférences.

Mais il se passe alors une chose terrible : Souvenez-vous, on est en train d'envoyer de la lumière avec une longueur d'onde très grande. Mais cela veut dire que un photon est très étendu dans l'espace (sa longueur d'onde peut être assimilée à son extension spatiale). Et alors, au moment où on observe de nouveau des figures d'interférences, le photon est tellement étendu dans l'espace, que l'on observe désormais un flash dilué, et on ne sait pas si le flash vient de la fente 1 ou de la fente 2.

Mais alors, vous allez me demander : Par quel trou l'électron passe-t-il ? On ne peut pas répondre à cette question. La réponse correcte est d'imaginer l'électron comme une onde, qui passe donc par les deux trous. Mais, au moment où vous le forcez à choisir par quel trou il passe (en le mesurant comme on l'a décrit), l'électron redevient une particule et se matérialise en un des trous.

1.5 Principe d'incertitude

Après toutes ces péripéties, j'espère que vous êtes convaincus que nos petits objets physiques, se comporte bien comme des ondes-particulaires, à savoir parfois comme des ondes parfois comme des particules, le choix devant être fait selon les échelles et les phénomènes en jeu.

Mais jusqu'ici, la situation est assez périlleuse : Nous avons vu avec l'expérience des fentes que l'on manquait de précision en mesurant la trajectoire des électrons avec des rayons lumineux. Mais je peux mesurer avec autre chose qu'un photon. Je peux par exemple me dire

que je vais prendre un autre type de particules qu'un photon, que je vais envoyer sur les trous pour mesurer par où est passé l'électron.

Que faut-il comme particule ? Il faut une particule qui change le moins possible la trajectoire de l'électron. Ce qui change la trajectoire de l'électron quand une particule le heurte est la quantité de mouvement de la particule. On veut donc l'envoyer avec une quantité de mouvement très faible.

Il faut aussi éviter le problème que l'on a eu avec les photons. Pour cela il faut que je sache très bien la position de la particule quand elle heurte l'électron.

Il se trouve que peu importe la particule que l'on utilise, on arrive jamais à trouver une particule qui vérifie ces deux critères. Et pour cause, en 1927, Heisenberg a montré ce qu'on appelle le principe d'incertitude, qui stipule que :

Propriété 5 : Principe d'incertitude d'Heisenberg

$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$ où Δp et Δx désignent les incertitudes sur la quantité de mouvement et la position.

Cela nous empêche de faire ce que j'ai proposé au dessus : si on connaît très bien la position de la particule, Δx est très petit, donc Δp est très grand, ce qui veut dire que p peut être très grand, ce qui veut dire que je ne peux pas envoyer une particule avec p petit.

Ce principe "protège" la mécanique quantique et nous empêche de tout mesurer de manière précise et déterministe. Si un jour l'un de vous parvient à mesurer la quantité de mouvement et la position d'une particule de manière excellente, alors la physique quantique sera faussée et s'effondrera. Mais personne n'y est parvenu jusqu'à maintenant.

1.6 L'onde, l'observateur et la mesure

Revenons un peu en arrière. Lorsque nous avons envoyé des photons sur les fentes, ils ont transformé notre figure d'interférence d'une interférence entre ondes vers une interférence entre particules. Il semble donc que l'interaction entre nos photons et nos électrons change le caractère d'onde en particule.

Mais c'est quand même étrange. Parce que dans notre expérience de base, nos électrons traversent l'air et donc sont dans tous les cas évidemment touchés par des photons, car il y a des photons partout dans l'air. Pourquoi ces photons eux ne modifient-ils pas l'expérience ?

La réponse est claire. Ce n'est pas vous qui avez envoyé ces photons. Vous ne les connaissez pas. Donc, on doit conclure que c'est parce que vous observez les électrons que vous modifiez ce qu'il se passe. Vous êtes un observateur, qui effectue une mesure, qui modifie la physique.

Les physiciens expliquent ce qu'il se passe comme ceci : votre onde se balade dans l'espace. Vous, en tant qu'observateur, mesurez l'onde, et donc vous la forcez à adopter une position ou une valeur précise. On dit que vous faites "effondrer l'onde".

1.7 synthèse de l'introduction

Résumons ce que nous avons vu de la physique quantique :

- Les "choses" qui ont une existence physique, comme un photon, un électron, un atome ou vous-même, sont des ondes. Ce sont des fluctuations de l'espace.
- Il existe des référentiels spéciaux (vous) qui sont des observateurs. Ces observateurs, lorsqu'ils observent un système physique, l'obligent à se fixer et ne plus être une onde. Cela

peut être extrêmement perturbant, mais remarquons que finalement, nous sommes juste en train de dire : "si nous ne regardons pas, n'observons pas telle chose, nous ne pouvons pas dire précisément quelle est sa situation." C'est tout à fait raisonnable de ne pas vouloir parler précisément d'une chose que nous ne pouvons pas observer.

- Tout cela est magnifique, mais notre objectif est de faire de la physique. On ne veut donc pas juste dire "voilà il y a tel et tel phénomène, qui sont très jolis". On veut prédire ce qui va se passer. Nous n'allons pas pouvoir faire cela dans ce cours, car c'est très dur et nous n'avons pas le temps, mais je peux vous le résumer. Les ondes peuvent être vues grossièrement comme indiquant "la particule est un peu là, un peu là, un peu là..." où le "un peu" est plus gros quand la valeur de l'onde est plus grande. Ainsi, l'onde nous donne la probabilité d'être à chaque endroit. Nous pouvons calculer l'évolution de l'onde en faisant comme dans votre cours sur les ondes, en suivant juste l'équation d'évolution de l'onde (qui en physique quantique est appelée équation de Schrödinger). Ensuite, dès que nous interagissons avec le système physique, nous effectuons une mesure ; alors le mot prédire doit vouloir dire prédire le résultat d'une mesure. Eh bien, ce que l'on peut dire de plus précis possible, c'est que le résultat est aléatoire, en suivant les probabilités données par l'onde.

- Voilà. C'est tout. Nous pouvons faire de la physique. Le seul problème est que nous avons cessé de prédire les choses exactement. Eh bien je ne peux rien vous dire d'autre que : acceptez cela. Désormais, on ne prédit que les chances que tel événement arrive. Et cela est finalement ce que vous faites dans la vie de tous les jours. Vous vous dites : "il y a 7 chances sur 10 que le PSG gagne la Ligue des champions cette année". Rien n'oblige les choses à être parfaitement prédictibles. Cela est le grand changement de paradigme avec la physique classique. En physique quantique, on ne prédit plus rien avec certitude.

- Enfin, rassurez-vous. Hors de la physique quantique, quand vous ferez de la mécanique, de l'électromagnétique, de l'hydrodynamique, etc., vous pourrez toujours considérer les choses comme des particules. Cependant, à la plus petite échelle, cela n'est plus vrai.

Préparation aux olympiades – version 2025-26 – contributeur : Mano Etilé-Zephoris
Sources des figures : Wikipedia