

Introduction à la mécanique quantique

Harold Erbin

Table des matières

1	Avant-propos	2
2	Dualité onde–corpuscule	2
3	Quantification	3
4	Inégalités de Heisenberg	3
5	Principe de superposition	5
6	Intrication	5
	Références	6

Ce texte est publié sous la licence libre

Licence Art Libre :

<http://artlibre.org/licence/lal/>

Version : 14 janvier 2010

1 Avant-propos

Mon but ici n'est pas d'expliquer en détails toute la mécanique quantique ni de rentrer dans le formalisme mathématique qui l'entoure, car il faudrait des livres entiers et une compétence que je n'ai pas. L'on pourrait me reprocher l'approche très classique, visitée et revisitée que j'emploie, mais il a bien fallu en choisir une, et j'ai cédé à la facilité.

Il convient de comprendre un point avant de commencer : la mécanique quantique est par nature hautement probabiliste (aspect qu'Einstein ne supportait pas ; lors d'un congrès, il se serait exclamé : « Dieu ne joue pas aux dés ! »), et la plupart des phénomènes décrits échappent au sens commun et il faut accepter de n'avoir aucune réponse définitive à la question « pourquoi est-ce ainsi ? », même s'il est tentant de le demander. Cette question, qui en recèle bien d'autres, a été à la source de nombreuses interprétations, et de nombreuses querelles de physiciens. Mais il serait trop long d'aborder l'aspect épistémologique, et nous nous dirons alors : « la nature est ainsi. »

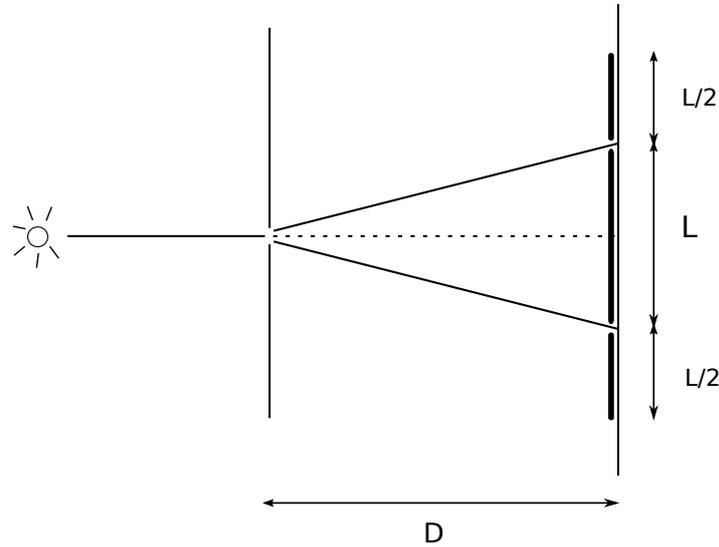
L'un des majeurs problèmes de la mécanique quantique est que la quasi-totalité de ses phénomènes se manifestent à une échelle très petite. Ainsi, il est difficile de mener des expériences ou des mesures, et donc de vérifier certaines hypothèses ; pour preuve : les expériences proposées par Feynman dans ses cours n'ont été réalisées que plusieurs années plus tard. Aussi faut-il garder à l'esprit, tout le long de cet exposé, que le quantique est un monde complètement différent du nôtre. Un monde fascinant.

2 Dualité onde–corpuscule

Au XVII^e siècle a commencé le débat pour déterminer si la lumière était une onde ou un corpuscule — c'est à dire une sorte de bille — (par exemple, Huygens défendait la première hypothèse, Newton la seconde). La question ne se posait guère pour les autres particules, qui n'ont été connues que très tard : jusqu'alors, il n'était pas venu à l'esprit que les atomes puissent être des ondes (ils étaient vus comme des corpuscules ou comme un mélange des quatre éléments — le feu, l'eau, la terre et l'air — selon les philosophies — car il ne s'agissait alors que de philosophies, de paroles, et non de physique véritable : nous agissons exactement en demandant actuellement « pourquoi ? » en parlant de la mécanique quantique). Il faudra attendre l'avènement de la mécanique quantique et les travaux d'Einstein (sur l'effet photoélectrique) pour réconcilier les deux points de vue, pourtant opposés a priori.

Ainsi, toute particule présente à la fois les propriétés d'une onde et d'un corpuscule. Ceci a plusieurs conséquences intéressantes qui permettent d'expliquer divers phénomènes. Par exemple, l'effet photoélectrique (utilisé pour produire du courant à partir de panneaux solaires) est expliqué par l'aspect corpusculaire de la lumière (on parle de photon pour nommer la particule "transportant" la lumière). De même, une onde de lumière peut être diffractée par une ouverture très fine, au même titre qu'une onde telle que les vagues : si l'on dirige un faisceau lumineux vers une fente, alors, au lieu d'observer uniquement un point en face de la fente, nous observons des tâches de lumière là où il ne devrait pas y en avoir.

FIGURE 1 – Diffraction par une fente



3 Quantification

La quantification est peut-être le concept à retenir en mécanique quantique : il signifie que le monde à l'échelle quantique n'est pas continu (on dit qu'il est discret). Prenons le cas de l'énergie : chaque particule ne peut accéder qu'à des niveaux précis d'énergie. Imaginons un immeuble : un escalier permet de s'arrêter à n'importe quelle hauteur de l'immeuble (même entre deux étages, sur une marche quelconque) ; au contraire, l'ascenseur ne nous permettra de s'arrêter qu'à des endroits précis (on considère que l'ascenseur ne peut pas tomber en panne et ne dispose pas de système d'arrêt d'urgence). Ainsi, l'ascenseur donne un bon aperçu de ce qu'est un état quantique.

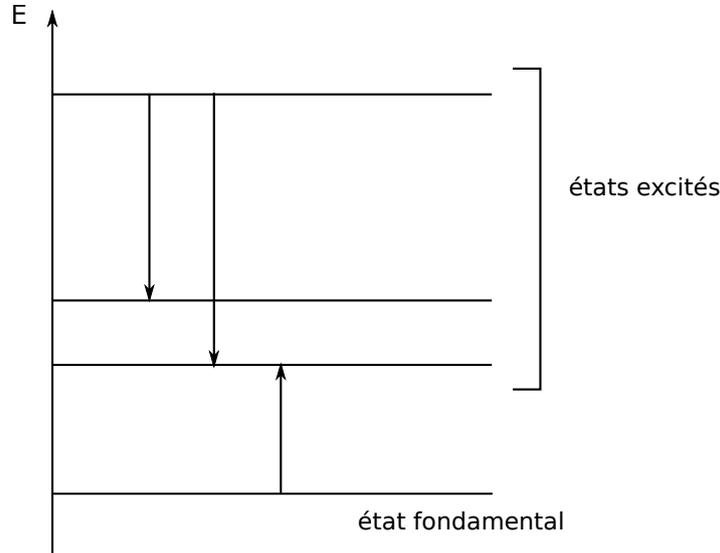
Du fait de cette particularité, chaque atome émet des photons ayant une énergie particulière, qui dépend du noyau concerné : on parle de spectre électromagnétique. Chaque spectre est unique et, ainsi, il est possible de déterminer la composition en atome d'un milieu simplement en examinant la lumière qu'il émet. Cette technique est utilisée pour analyser la composition des atmosphères des exoplanètes (et espérer y trouver de l'eau).

Sur la figure 2, les traits horizontaux indiquent les différents niveaux d'énergie accessibles pour un atome (arbitraire). Les flèches verticales sont des exemples de transitions (ou changements) d'énergie possibles : aucune valeur intermédiaire d'énergie n'est accessible à l'atome.

4 Inégalités de Heisenberg

Ces inégalités, inventées par Heisenberg, sont parfois souvent appelées principe d'incertitude, mais ce terme ne devrait pas être employé. Ces inégalités disent qu'il est impossible de connaître à la fois la vitesse et la position d'une particule.

FIGURE 2 – Quantification d'un atome



Cela signifie que plus l'on a d'informations sur l'une des deux quantités, moins l'on pourra en avoir sur l'autre.

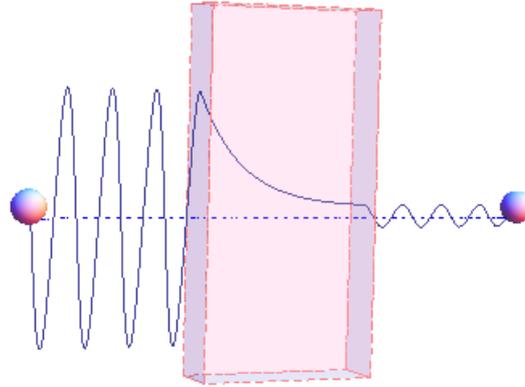
Illustrons ce principe : vous êtes en voiture et vous vous faites flasher par un radar de police. Alors soit le compteur de vitesse indiquera précisément votre vitesse, mais l'image sera totalement floue (sans quoi il serait possible de vous localiser), soit l'image est très nette mais le compteur de vitesse n'indique rien. Voici ce qui se passerait si le principe d'incertitude existait à notre échelle (ce qui serait d'une grande aide à ceux que les limitations déplaisent...).

Mathématiquement parlant, cela se caractérise par le fait que chaque particule possède une fonction d'onde (calculée par l'équation de Schrödinger) qui permet de calculer la probabilité de présence de la particule en un point de l'espace. On peut imaginer qu'une particule, au lieu d'être représentée par un point, peut être représentée par une sphère large, et la particule peut se trouver en chaque point à l'intérieur de la sphère. Maintenant, si l'on fait avancer la particule (*i.e* la sphère) contre un obstacle (un mur d'atomes), alors si ce mur est suffisamment fin, il se peut que la sphère dépasse derrière le mur, et il existe alors une probabilité non nulle que la particule se retrouve derrière le "mur". On parle d'effet tunnel.

Par exemple, si vous vous mettez à foncer vers un mur sans vous arrêter, alors tout ce que vous risquez est de vous faire (très) mal. Toutefois, si vous étiez une particule face à un mur d'atomes (à l'échelle quantique, cela va de soit), il se pourrait que vous vous retrouviez derrière le mur (non, les garçons, n'allez pas espérer que cela fonctionne un jour pour vous retrouver dans la salle de bain des filles).

L'effet tunnel explique, par exemple, pourquoi nos appareils électriques se déchargent même lorsqu'ils sont éteints : l'isolant est trop fin et certains électrons parviennent à le franchir par effet tunnel.

FIGURE 3 – Effet tunnel



5 Principe de superposition

Cet aspect de la mécanique quantique est représenté par le paradoxe très connu du chat de Schrödinger : l'on enferme un chat dans une boîte totalement hermétique où se trouvent une fiole de cyanure, un détonateur et un élément radioactif. Si une particule radioactive est émise, alors le détonateur entraîne la cassure de la fiole de cyanure, ce qui a pour conséquence la mort du chat. Au bout d'un certain temps, disons trente secondes, l'élément radioactif a eu 50% de chances d'émettre une particule radioactive. De fait, après trente secondes, et tant qu'aucune observation (mesures comprises) n'est faite, alors il est impossible de dire si le chat est vivant ou mort : il est à la fois mort **et** vivant. C'est l'ouverture de la boîte qui forcera le système à adopter un seul état. On parle de décohérence.

Il s'agit encore une fois d'une conséquence de l'équation de Schrödinger.

6 Intrication

L'intrication consiste, en quelque sorte, à lier entre elles deux particules. Elle peut être réalisée avec un laser. Il est alors impossible de décrire l'état d'une particule seule, même si les particules ne sont pas situées au même endroit.

Prenons un exemple pour illustrer ce propos. Nous avons deux "lanceurs" de pièces de monnaie au début de deux pistes de longueurs égales. Au même instant, chaque lanceur envoie rouler une pièce qui, arrivée au bout de la piste, tombe. Il est sensé de penser que les pièces vont tomber totalement au hasard : deux pièces peuvent donner soit deux piles, soit deux faces, soit une pile et une face. Ainsi, à chaque lancement, il existe seulement 50% de chance que les deux pièces tombent du même côté. Maintenant prenons des pièces quantiques, les pièces lancées en même temps étant intriquées. Alors, en arrivant en bout de piste, les deux pièces tomberont systématiquement du même côté : il sera impossible d'obtenir une face et un pile lors du même lancer.

Voici un concept qui pourrait être très pratique pour tricher en cours ; vous intriquez votre copie avec celle du meilleur de la classe, et en écrivant sur la

RÉFÉRENCES

sienne il remplira la vôtre par la même occasion (enfin, il faudrait quand même penser à effacer le nom après).

C'est le concept à la base de tous les espoirs au sujet de l'information quantique, et plus particulièrement de la "téléportation" quantique. Que l'on ne se méprenne pas : il ne s'agit pas d'envoyer un objet à un autre endroit, mais plutôt de transmettre instantanément une information. Si nous intriquons deux particules ensemble et que nous en gardions une sur Terre, et que nous envoyions l'autre ailleurs (sur la Lune, à l'autre bout de la galaxie...), alors si l'état d'une particule venait à changer, l'autre particule adopterait immédiatement le même état (des expériences auraient prouvé que cette information se transmettait à une vitesse bien supérieure à celle de la lumière). Ceci permettrait donc de communiquer avec n'importe qui, n'importe où.

De même, l'intrication, ainsi que la superposition des états, sont deux particularités qui pourraient être exploitées pour obtenir un ordinateur quantique, dont la puissance serait bien supérieure à celle de nos ordinateurs actuels. Hélas nous ne disposons pas encore des moyens techniques pour mener à bien leur réalisation.

Références

- [1] Richard Feynman, R. Leighton, and M. Sands. *Mécanique 2*. Les cours de physique de Feynman. Dunod, 1999.
- [2] Thierry Masson. La physique quantique, 100 ans de questions. *Les Cahiers Rationalistes*, 569, 570, 2004.
<http://science.thilucmic.fr/spip.php?article20>.
- [3] Valerio Scarani. *Initiation à la physique quantique — La matière et ses phénomènes*. Vuibert, troisième édition, 2003.