



100-1- Heisenberg et l'incertitude quantique

Quand on mesure (observe) la position d'un avion, d'un projectile ou d'un train, on en connaît parfaitement la vitesse et la position, à chaque instant. On dit que l'objet suit une trajectoire parfaitement définie à chaque instant, par sa vitesse et sa position, justement.

Pour un objet quantique (photon, électron, etc.) cette détermination parfaite de la position et de la vitesse (en fait, la quantité de mouvement $p=m.v$) à chaque instant est tout simplement impossible. Non pas à cause de l'imperfection des instruments de mesure, mais à cause d'une propriété inhérente aux composants quantiques du monde !

C'est Werner Heisenberg qui formule ces inégalités qui disent qu'on ne peut connaître simultanément (au même instant) et avec précision la position (x, y, z) et la vitesse v (en fait $m.v$) d'un quantum de matière. La mesure impose une incertitude quant au résultat de la mesure. La seconde inégalité d'Heisenberg s'applique à la relation énergie et temps.

Ce principe d'incertitude est le second principe fondamental de la physique quantique. On ne peut donc pas parler de la trajectoire d'un électron au sens classique. Feynman parle de "chemin". Cette incertitude sur la mesure est directement reliée à la constante de Planck (h) , je ne donne pas ici les deux inégalités, elles sont faciles à trouver sur le net.

100-2- De quoi est fait ce monde ?

a- Les composants élémentaires de la matière (ou presque élémentaires, parce que les neutrons et les protons sont faits de quarks) se comportent comme des ondes ou comme des particules selon le type de mesure effectué. Ceci est inconnu à notre niveau de réalité (de perception).

b- Les composants élémentaires de la matière ne suivent pas les règles précises et exactes de la mécanique classique (newtonienne), la mécanique du monde perçu par nos sens : 1- les sauts quantiques ignorent l'espace-temps et 2- Les trajectoires au sens classique n'existent pas. On parle de probabilité de présence d'une « particule » au moment t de la mesure.

Pour Einstein et Schrödinger, c'est un casse-tête presque intolérable ! Et pour vous, qui lisez ces lignes ? Cela dérange-t-il quelque chose dans votre vision du monde et de la matière ? Pour Bohr et Heisenberg ces découvertes n'en sont pas moins incroyables, mais ils s'en accommodent assez bien, même si personne ne comprend rien au pourquoi de ces comportements pour le moins extraordinaires sinon bizarres des composants de la matière.

100-3- L'interprétation dite "de Copenhague" de la mécanique quantique

Les défenseurs de cette interprétation – qui, en fait, définit la première révolution quantique (les années 1920) – sont essentiellement Niels Bohr (qui a donné son nom à cette interprétation puisque son Institut se trouvait à Copenhague au Danemark), Heisenberg, Max Born, Wolfgang Pauli, etc. Voici leurs conclusions, leur interprétation de la mécanique quantique :

a- Les réalités ondulatoire et corpusculaire des constituants de la matière sont complémentaires. La réalité dépend du type de mesure (d'observation) effectué. Ce sont deux aspects mutuellement exclusifs et complémentaires de la même réalité. Cela fait hurler Einstein qui n'en peut plus (voir le congrès de Solvay, Bruxelles 1927).

b- C'est la mesure (le type d'appareillage et la méthode utilisée) qui définit la réalité et la nature de la réalité. (Là, Einstein étouffe mais à Bruxelles, il ne dit rien, et Schrödinger n'en revient pas – qu'Einstein ne dise rien).

c- Tant qu'il n'y a pas de mesure, il n'y a pas de photons, pas d'électrons, etc. C'est le fameux principe d'inconnaisabilité. Einstein dira : « Alors, si personne ne regarde la lune, la lune n'existe pas !? Ou si personne ne voit ou n'entend un arbre tomber, l'arbre n'est pas tombé !? » Cela nous amène déjà vers la notion de superposition d'états (voir le chat de Schrödinger, à la fois mort et vivant tant qu'on n'aura pas ouvert la boîte. Cette expérience de pensée, il l'a conçue pour montrer l'absurdité – selon lui – d'une telle interprétation (de Copenhague).

d- La mécanique quantique établit l'échec final de la causalité, disent Bohr, Heisenberg, Born, Pauli. C'est l'abandon du réalisme : c'est l'observation qui définit la réalité.

Voici une citation de Max Born (celui qui a énoncé le calcul probabiliste en utilisant la fonction d'onde de Schrödinger) : « *Le mouvement des particules obéit à des règles de probabilités, alors que la probabilité elle-même se propage suivant la loi de causalité.* » (!!!)

(On pourrait appeler cela une énigme quantique). Autrement dit, hasard quantique et probabilités (quantiques) ne signifient pas « sans causes » ! Ce point est fondamental et surtout en considération de ce qui va suivre avec la non-localité quantique (seconde révolution quantique).

100-4- La fin du dogme déterministe ? Faux hasard et vrai hasard

a- L'interprétation probabiliste (définie par Max Born) de la fonction d'onde remet en question le dogme fondamental de la physique classique : le déterminisme. L'univers newtonien et l'univers relativiste d'Einstein sont totalement déterministes : ils ne laissent aucune place au hasard. C'est le principe de causalité qui agit dans notre vie courante.

b- En physique classique – dans le monde tel que nous le connaissons par le mental et les cinq sens – la notion de hasard indique une ignorance humaine dans un univers déterministe. Par exemple, dans un tirage de pile ou face (pièce non truquée) ou dans un tirage de dés (dés non truqués) on dira que c'est un tirage au hasard. Mais ce n'est pas du vrai

hasard. Les causes du résultat sont simplement trop complexes à définir et à mesurer. Mais les causes qui font que l'on obtient un 5 et non un 4 existent bien. Ce n'est donc pas du pur hasard au sens quantique du mot (revoir le texte sur les sauts quantiques pour bien comprendre cela).

c- Le déterminisme classique, ou principe de causalité dit : *Tout effet a une cause et toute cause précède son effet*. En physique quantique (par exemple pour les sauts quantiques) on ne connaît pas de cause qui puisse déterminer le résultat (le moment du saut d'un niveau 2 à un niveau 1 – par exemple – ni la direction de ce saut). Rappelez-vous Schrödinger et les puces ! En physique quantique on ne peut que calculer une probabilité, par exemple, la probabilité d'une position d'un électron après une collision à l'instant t de la mesure.

d- Avant la mesure, l'électron ne se trouve nulle part (Bohr). Quand on effectue une mesure, la fonction d'onde s'effondre pour manifester un seul état parmi les états possibles. La probabilité de position devient alors égale à 1 : la position est connue et certaine, par la mesure effectuée. C'est ce qu'on appelle le paradoxe de la mesure : pourquoi un certain résultat plutôt qu'un autre ? Avant la mesure, on avait une superposition d'états (possibles) – le chat dans sa boîte, à la fois mort et vivant. Au moment de la mesure, on n'a plus qu'un état : l'état observé. Celui-ci ne peut pas être prédit d'avance. On ne peut que donner une probabilité du résultat. Pourquoi ce résultat plutôt qu'un autre ? Voilà la question.

100-5- Conclusions – La seconde révolution (1935-1982) se prépare

Tout ceci résume les éléments essentiels de la première révolution quantique (1905-1935). Le fameux duel Bohr-Einstein tourne essentiellement autour de cette définition de la réalité et du rôle du hasard dans le "fonctionnement" de la réalité. Einstein a adopté une position de réalisme : la réalité est ce qu'elle est, indépendamment de la mesure, indépendamment de l'observateur. Et bien sûr il y a aussi son fameux « Dieu ne joue pas aux dés. » Mais c'est surtout la menace sur le réalisme qui va totalement paralyser Einstein dans sa relation avec la physique quantique. Einstein ne supporte pas une vision du monde autre que le réalisme. Qu'en est-il pour vous ?

On pourrait penser que le réalisme (position d'Einstein) est la position juste et vraie. On verra (seconde révolution quantique) que les choses ne sont pas aussi simples que cela. Einstein n'avait pas vraiment raison, mais il n'avait pas non plus totalement tort (voir à ce sujet les réflexions de Roger Penrose sur la position d'Einstein en physique quantique).

Marc Saint Hilaire