

# L'EXTRAVAGANCE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Par Michel Grand  
décembre 2013

L'une des contributions durables de l'immense philosophe et physicien Emmanuel KANT ( 1724-1804) fut de défendre l'idée de la nécessité d'établir une claire distinction entre la réalité perçue et la vraie réalité.

D'après lui, le fait d'utiliser nos sens d'observateur « caché » pour appréhender la vraie réalité produit des modifications dans la nature-même de cette réalité.

Les lois «excentriques et indigestes » (*et pourtant parfaitement confirmées par l'expérience*), de la physique quantique en constitue une preuve irréfutable.

Nous aimons à considérer que nous avons suffisamment de recul pour observer la nature sans la perturber. Mais nos esprits ont des travers pour comprendre les choses et l'information que nous en retirons passe inévitablement par eux.

Les scientifiques et mathématiciens du XIX<sup>e</sup> siècle comme GAUSS furent fortement influencés par les vues de KANT concluant en quelque sorte que seul le langage « vraiment naturel » que constitue les mathématiques était à même de nous permettre d'approcher la réalité avec suffisamment d'objectivité.

Nous allons tenter de donner dans ce petit mémoire un aperçu le moins approximatif possible de ce que cachent ces « extravagances » .

Richard Feynman, (un des meilleurs pédagogues de la physique quantique du XX<sup>e</sup> siècle) ne disait-il pas à ses étudiants de première année : « *Ne soyez pas effrayés par ce que je vais vous expliquer pendant les sept ans que nous allons passer ensemble, je n'y comprend rien moi-même* » .

## NAISSANCE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

### **Le monde des corpuscules (ou particules) et le monde des ondes :**

A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la quasi-totalité des phénomènes physiques relevaient principalement de deux théories :

- L' électromagnétisme de Maxwell qui expliquait les phénomènes électriques, magnétiques, optiques et d'une manière générale la mécanique ondulatoire.
- L'attraction universelle de Newton , base de la mécanique et de l'astronomie.

Ces deux théories s'étaient finalement partagé le gâteau de la physique en créant les notions fondamentales d'onde et de particule :

- a) Le concept de particule représentant un objet physique ( un électron, une planète) avec un ensemble de positions constituant une trajectoire et une masse correspondant à une quantité de matière.
- b) Le concept d'onde ou de champ qui ne concerne pas le mouvement de la matière ( comme la trajectoire d'une balle), mais un mouvement dans la matière ( par exemple les vagues d'une mer agitée qui transmettent de proche en proche de l'énergie et non de la matière) .

Bien assise sur cette dichotomie, la physique classique donnait tellement satisfaction qu'elle a permis le développement industriel du XIX<sup>e</sup> siècle que l'on connaît.

*Nota : Cette notion de propagation dans la matière ( l'eau, l'air) qui était attribuée aux ondes quelles qu'elles soient, était tellement ancrée dans l'esprit des physiciens du XIX<sup>e</sup> et du début du début du XX<sup>e</sup> siècle, qu'ils se sont échinés à inventer un milieu (l'éther) au sein duquel la lumière pouvait se propager ; et ce, jusqu'à ce que EINSTEIN démontre en 1905 que c'était parfaitement inutile. (voir Pourquoi  $E=MC^2$  page 6).*

## La catastrophe ultraviolette :

Tout cela donc, fonctionnait à merveille à quelques détails près. Or, c'est un de ces détails qui allait provoqué la première fissure dans ce bel édifice.

Dans les années 1880 plusieurs physiciens étudient les variations de rayonnement d'un corps chauffé à différentes températures. Un morceau de fer par exemple, passe successivement du rouge sombre au rouge clair, puis à l'orange, puis au blanc en fonction de l'élévation de température. En fait ce que notre œil perçoit, c'est la superposition des différentes longueurs d'onde émises par le corps chauffé ; l'ensemble de ces rayonnements est ce que l'on appelle le « spectre » correspondant à la température. Si la puissance d'un rayonnement donné est nettement plus élevée que celle de ses voisins, c'est lui que nous percevons en priorité.

Pour le fer par exemple, à 600°C le rouge domine ; à 2000° C le métal paraît blanc parce que toutes les composantes de la lumière visible s'additionnent.

Aux basses température (infrarouge), et au dessus de 2000°C (ultraviolet) le rayonnement existe aussi, sauf qu'il n'est pas accessible à notre système de vision.

Fort de ces constatations, des physiciens allemands et anglais établissent des lois dont une qui détermine, pour une température et une longueur d'onde données, la puissance rayonnée : « *La puissance rayonnée est proportionnelle à la température absolue et inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde* » En clair, le rayonnement thermique est d'autant plus intense que la longueur d'onde est plus courte.

Dans un premier temps, l'expérience corrobore la loi ; de l'infrarouge au vert, l'expérience confirme le calcul. Mais pour le bleu, le violet et surtout l'ultraviolet, la formule loin de fonctionner, peut donner des résultats qui, pour les très petites longueurs d'onde, peuvent tendre vers l'infini.

C'est ce que le Physicien autrichien Paul Ehrenfest appellera « la catastrophe ultraviolette ».

## PLANCK (Zorro) arrive :

C'est là, en 1900, qu'intervient l'un des plus grands génies de sa génération, celui que l'on peut considérer comme le pionnier de la physique quantique, le physicien allemand Max PLANCK (1858-1947).

Celui-ci émet l'hypothèse « hérétique à l'époque » selon laquelle l'agitation (ou la vibration) des molécules à l'origine de l'élévation de température d'un corps ne se répartit pas selon une loi continue mais par « paquets » de manière discontinue, selon une loi déterminée : *Si E représente l'énergie d'une vibration et  $\nu$  (nu) sa fréquence, alors il existe une constante h telle que  $E/\nu$  est toujours un multiple entier de h*. Il ne se produit pas de vibration pour les énergies correspondant à des valeurs d'énergies intermédiaires.

Ce petit h que l'on retrouve dans la plupart des équations de physique quantique est l'universellement célèbre constante de PLANCK. Sa valeur est très faible, environ  $6,63 \times 10^{-34}$  en joule.seconde, ou  $4,13 \times 10^{-15}$  en électron-volt.seconde.

En résumé, PLANCK propose comme principe que les échanges d'énergie entre matière et rayonnement, s'effectuent par « paquets » de quantités définies (d'où le nom de « *quantum* » et le pluriel « *quanta* »). De plus chaque quantum contient une énergie proportionnelle à la fréquence de son rayonnement. Ce qui a pour effet d'éviter le syndrome de « *la catastrophe ultraviolette* ».

Cette constante de proportionnalité introduite par Planck va semer le trouble chez les physiciens y compris chez Planck lui-même. Il va même passer des années à tenter de résoudre le problème de « *la catastrophe ultraviolette* » en éliminant la notion de quanta ; mais, heureusement, sans y parvenir.

## EINSTEIN amène son grain de sel :

L'affaire rebondit quand un jeune employé du bureau des brevets de Berne, un certain Albert EINSTEIN, 26 ans, fait une communication où il démontre que l'effet photo-électrique, lui aussi, ne peut être compris que si l'on admet que la lumière qui le produit est formée de quanta discontinus d'énergie.

L'effet photo-électrique, comme la catastrophe ultraviolette faisait partie de ces « épines dans le pied » dont les physiciens de l'époque n'arrivaient pas à se débarrasser. En clair, la physique classique ne parvenait pas à en donner une explication satisfaisante.

Dans sa communication, Einstein reprend l'hypothèse de Planck et l'adapte à la lumière. Il suppose qu'une lumière monochromatique, c'est à dire avec une fréquence unique  $\nu$  (nu), est formée d'une myriade de corpuscules porteurs d'un même quantum d'énergie. Quand un des corpuscules frappe

une plaque métallique, il communique son quantum d'énergie à un électron, lequel en dépense une partie pour s'arracher à l'attraction de son noyau, et transforme le reste en énergie cinétique, autrement dit en vitesse. Toujours fidèle à la doctrine de Planck, Einstein ajoute que la quantum d'énergie possédée par le corpuscule de lumière est d'autant plus grand que la fréquence de la radiation est plus élevée (ou que sa longueur d'onde, inversement proportionnelle à la fréquence, est plus courte)

Einstein en conclut donc que l'énergie cinétique des électrons est donnée par une formule très simple :

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

$h$  étant constante,  $\nu$  la fréquence de la radiation et  $W$  la dépense d'énergie que doit fournir l'électron pour s'arracher au métal.

En 1915, un physicien américain Robert Millikan confirmera expérimentalement la loi d'Einstein ainsi que la valeur numérique de  $h$  donnée par Planck.

Ainsi, la lumière elle-même est formée de grains d'énergie que l'on appellera « photons » à partir de 1923.

Mais alors, qu'en est-il de la nature ondulatoire de la lumière démontrée depuis Huygens au XVII<sup>e</sup> siècle et confirmée par les expériences d'interférence de Fresnel ?

Avant de répondre à cette question il faut d'abord s'intéresser à d'autres éléments historiques.

### **L'atome selon RUTHERFORD:**

Selon Ernest Rutherford physicien/chimiste anglais (1871-1937), l'atome est comparable à un système solaire où l'attraction gravitationnelle est remplacée par l'attraction électrique. La masse et la charge positive étant concentrées dans un noyau central (analogue au Soleil), autour duquel graviteraient (comme des planètes) des électrons de charge négative.

Cette interprétation planétaire particulièrement séduisante, (et quelque fois encore utilisée dans les livres scolaires) avait cependant un défaut de taille.

En effet, une charge électrique dont le mouvement n'est pas rectiligne uniforme, mais accéléré (ce qui est le cas d'un mouvement circulaire même à vitesse constante, appelée accélération centripète) émet un rayonnement et perd de l'énergie ; les électrons étant condamnés à s'écraser sur le noyau en moins d'un cent millionième de seconde.

Il est évident que cela pose un tel problème que nous ne serions pas là pour en parler.

### **L'atome selon BOHR :**

Intrigué par l'anomalie de la version Rutherford, Niels Bohr physicien danois (1885-1962), introduit à son tour une sorte de discontinuité « planckienne » au sein de l'atome. Il postule que le rayon de l'orbite circulaire ne peut varier de façon continue, et qu'il faut lui assigner des valeurs déterminées dans lesquelles intervient la constante de Planck. C'est à dire que les électrons ne peuvent graviter que sur des orbites bien précises mais toujours au-dessus d'une orbite dite fondamentale en dessous de laquelle les électrons ne peuvent descendre. Chaque électron peut sauter sur l'orbite supérieure si on lui fournit l'énergie nécessaire (sous la forme d'un photon) ou descendre sous l'orbite inférieure en rendant de l'énergie (également sous la forme d'un photon).

Cette simple construction de l'esprit, au fil des ans, prendra de plus en plus consistance et se dotera de caractéristiques telles que la plus ou moins forte liaison de l'électron au noyau, les effets magnétiques (voir « *Les horloges atomiques* », page 2) ou la détermination du « spin » (lequel ne peut être qu'un multiple entier ou demi-entier de la constante de Planck divisée par  $2\pi$ ).

### **La couche supplémentaire de Louis de Broglie :**

En 1924 le physicien français Louis de Broglie (1892-1987), soutient une thèse de doctorat sur « la nature ondulatoire de l'électron qui dit en gros : « *À toute particule matérielle de masse  $m$  et de vitesse  $v$  doit être "associée" une onde réelle reliée à la quantité de mouvement par la relation  $\lambda = h / p$  »*

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $h$  la constante de Planck,  $p$  la quantité de mouvement, (la quantité de mouvement étant le produit de la masse par la vitesse).

Cette théorie posait les bases de la mécanique ondulatoire. Elle fut soutenue par Einstein, confirmée en 1927 par les expériences de diffraction des électrons de Clinton Davisson et Lester Germer, et surtout généralisée par les travaux de Erwin Schrödinger.

*Nota : La formule de De Broglie est en fait:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  (où on reconnaît le coefficient  $\gamma$  du mémoire*

*Pourquoi  $E=MC^2$ )*

On peut cependant se demander pourquoi ce postulat semble ne pas s'appliquer aux objets macroscopiques. La réponse est dans la formule, car la quantité de mouvement  $p$  sera extrêmement grande par rapport à  $h$  et l'aspect ondulatoire sera indécélable ( $\gamma$  tendant vers 1 aux vitesses terrestres).

### **Dernière couche Heisenberg, Schrödinger, Dirac:**

Avec ces trois « maestros » de la physique quantique, il n'y a plus ni onde ni particule. On conçoit l'atome comme un noyau entouré d'un nuage électronique, sachant qu'on ne sait pas où se trouve l'électron recherché, ni quelle est la nature de sa trajectoire éventuelle. On sait seulement que la probabilité de le trouver à une certaine distance du noyau est proportionnelle à la densité de ce nuage.

Il faut donc définitivement abandonner une quelconque représentation réaliste, pour considérer le phénomène plutôt comme une entité mathématique.

*Nota ; il en est de même pour la notion de spin dont on ne peut donner aucune image sérieuse.*

Rappelons toutefois que les expressions pratiques et pédagogiques ( orbites, couches, niveaux d'énergie) sont toujours utilisées dans les ouvrages de vulgarisation, faute de quoi il faudrait en passer par des équations hors de portée du « tout public »

## LA THEORIE

### **L'équation de Schrödinger :**

Erwin SCHRÖDINGER physicien autrichien (1887-1961) est surtout connu du grand public pour son histoire de chat, et pour son livre «*Qu'est-ce que la vie* » écrit en 1944, inspirant par la même occasion, Watson et Crick dans leur recherche de l'ADN .

Reprenant les travaux de De Broglie, il met au point en 1926 l'équation d'onde  $\Psi(r)$  qui porte son nom et qui régit le comportement des particules matérielles. Appliquées aux ondes de De Broglie, cette équation permet non seulement de décrire le comportement d'un électron, mais surtout de reconstituer rigoureusement le spectre de chaque atome, c'est à dire l'ensemble des radiations lumineuses qu'il émet à des fréquences bien précises. Les électrons sont désormais considérés comme vibrations électriques réparties autour du noyau ; de la combinaison de ces vibrations on peut, par le calcul, prévoir les émissions de lumière possible, et même déterminer les intensités des raies spectrales.

Cette équation lui valut, en commun avec Paul Dirac, le prix Nobel de physique de 1933 .

Les particules ne seraient donc que des ondes regroupées en paquets paraissant ponctuels à notre échelle.

Nous verrons plus loin ce qu'implique l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, (à la fois mort et vivant), car elle met en scène une des extravagances de la physique quantique : la superposition des états.

### **Les matrices d' HEISENBERG physicien allemand (1901-1976):**

Alors que Schrödinger formalise sa théorie par des équations différentielles, Werner Karl Heisenberg va opter pour une démarche différente en utilisant un outil mathématique particulier : le calcul matriciel. C'est sous forme de matrices qu' Heisenberg transcrit les fréquences et le intensités de la lumière émise par l'atome. Ses tableaux permettent, par exemple, de calculer les différents niveaux d'énergie d'un atome (Bohr aurait parlé d'orbites). En résumé, la théorie des matrices substitue aux éléments physiques (à priori hypothétiques) de l'atome de Bohr, un groupe de quantités représentant la seule chose que l'on connaisse vraiment, à savoir le rayonnement provenant de la région où l'atome est sensé se trouver.

Si abstraite que soit cette « mécanique des matrices » elle a l'avantage de « coller » parfaitement à l'expérimentation. Et cela, bien qu'elle comporte une caractéristique gênante. En effet, alors qu'en physique classique la multiplication de deux quantités (comme la vitesse et la position) est commutative, c'est à dire  $A.B = B.A$ , le produit matriciel lui, l'est rarement  $A.B \neq B.A$  (en principe). Ce qui veut dire que l'ordre des mesures, peut changer fondamentalement le résultat. Si nous mesurons d'abord la vitesse, le résultat concernant la position ne sera pas le même que celui que nous aurions obtenu en mesurant d'abord la position et ensuite la vitesse.

### Le principe d'incertitude (ou d'indétermination) :

En 1927, Heisenberg formule une propriété fondamentale de la mécanique quantique qui dit que, contrairement à la physique classique, il est impossible de mesurer de façon exacte, à la fois la position d'une particule en même temps que sa vitesse. Plus on détermine avec précision l'une, moins on saura de chose sur l'autre.

Pour donner une image du phénomène, certains auteurs du début du XX<sup>e</sup> siècle, utilisaient ce qu'ils appelaient : la métaphore de l'oiseau de nuit :

« Un ornithologue veut étudier un oiseau nocturne inconnu. Mais cet oiseau est peureux ; si on l'éclaire, il ne bouge plus et on ne sait rien de son comportement ; si on l'observe dans la pénombre, l'oiseau vaque à ces occupations, mais ne peut être étudié du point de vue morphologique ».

En fait, cela ne semble pas si étonnant car on ne peut observer quelque chose qu'en l'éclairant avec de la lumière ( c'est à dire avec des photons). Or à l'échelle de l'infiniment petit, cela pose un problème qui n'existe pas (en apparence) au niveau macroscopique. Le moindre photon qui percute ou interagit avec un électron va modifier la trajectoire initiale de ce dernier et/ou le faire changer de niveau d'énergie (orbite). A cette échelle, le photon devient un projectile qui pourra déterminer la position de l'électron, mais qui aura aussi modifié sa vitesse et sa trajectoire; celle ci ne pourra donc pas être connue en même temps. Au niveau subatomique, la moindre mesure interfère avec l'objet de la mesure et le modifie.

Finalement, les physiciens d'aujourd'hui ont un discours quelque peu différent mais qui corrobore toutefois les théories de Schrödinger et Heisenberg . Ils considèrent que les particules (qu'ils appellent « quantons ») ont bien des propriétés analogues à des critères comme la vitesse et la position, mais de manière floue, non déterministe ; propriétés qui, toutefois, prennent consistance dès qu'on les mesure.

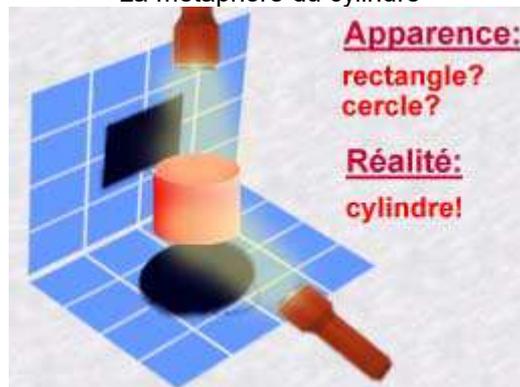
### Les ondes de De Broglie et de Schrödinger :

Les ondes de De Broglie et de Schrödinger correspondent, dans cette approche d'indétermination, à trouver la particule en un endroit donné. La particule n'étant plus un point matériel classique, mais un paquet d'ondes probabilistes, c'est à dire une superposition de mouvements dans toutes les directions, dont on peut seulement évaluer la probabilité de la trouver dans une certaine région de l'espace . C'est le rôle de la fonction d'onde.

### Alors, la lumière, corpuscule ou onde, ou bien corpuscule et onde?:

Aucune de ces deux assertions est objective. Il serait préférable de dire que ce sont deux façons de voir les objets et non les objets eux-mêmes.

La métaphore du cylindre



La célèbre expérience de des fentes de Thomas Young faite en 1803, (et refaite maintes fois avec du matériel de plus en plus performant) en est la meilleure illustration.

Considérons un canon qui projette des billes de manière aléatoire sur un mur où est pratiquée une fente très étroite. Celles qui ont la chance de passer la fente, vont s'incruster sur un panneau de matière tendre se trouvant derrière le mur. Au bout d'un nombre important de tirs ( fixé par exemple par un temps), on constatera une forme verticale composée des billes incrustées dans le panneau. Si on recommence l'expérience en pratiquant deux fentes dans le mur, le résultat sera similaire avec deux formes verticales d'incrustation au lieu d'une ; et si le temps de mitraillage est le même que dans la première expérience, la somme des deux formes sera environ égale à la forme de la première expérience. Au plus le nombre de tirs sera important, au plus cette assertion sera vérifiée.

Maintenant, si on considère l'option selon laquelle la lumière est faite de particules, on devrait pouvoir reproduire ce même résultat en remplaçant le canon à billes par une source lumineuse monochromatique, (c'est à dire qui émet de la lumière d'une longueur d'onde fixe et précise), le mur (et beaucoup plus près) par un écran percé de deux fentes verticales et la plaque de matière tendre, par une plaque photographique.

Ce n'est pas du tout ce qui se passe, nous verrons même que quelque soit la manière dont on envoie les photons, ce résultat n'est jamais atteint.

La source  $S_0$  envoie la lumière sous la forme d'une onde. Les fentes se comportent comme de nouvelles sources  $S_1$  et  $S_2$ . les deux sources fictives émettent chacune une vague d'ondes plus ou moins décalées dans le temps selon les trajectoires. Lorsque deux ondes sont en phase, elles s'additionnent ; lorsqu'elles sont décalées elles s'annulent, ce qui se traduit sur la plaque photographique par des raies brillantes et des raies sombres. Ce phénomène s'appelle phénomène d'interférence. Ceci est bien la preuve d'un comportement ondulatoire de la lumière

Certains scientifiques se sont dit que, qu'il s'agissait peut-être d'une illusion trompeuse due à l'entrechoc des particules entre elles. Ils ont donc décidé de faire en sorte d'envoyer les photons un à un en réduisant l'intensité de la source.

On recommence l'expérience avec une seule fente. Le résultat est clair : les photons se comportent comme des particules.

On recommence une nouvelle fois avec deux fentes.

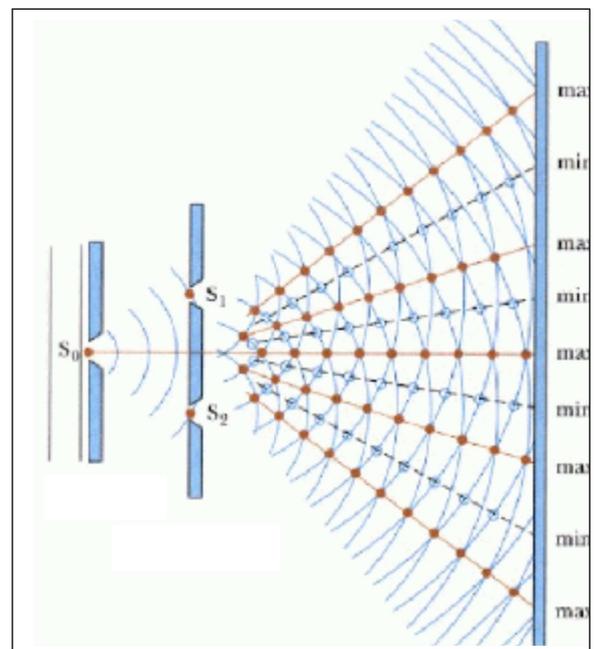
Si au début le résultat semble combler leur attente, les photons semblent bien se comporter comme des corpuscules ; Il n'en est pas de même au bout d'un certain temps ; les franges d'interférence se reforment. La lumière a de nouveau un comportement ondulatoire.

C'est on ne peut plus troublant, car cela signifie clairement que, non seulement les photons se comportent à nouveau comme des ondes, mais qu'un même photon pourrait passer par les deux fentes à la fois.

Dirac dira qu'un photon interfère avec lui-même. Nous verrons plus loin, l'importance de ce comportement mystérieux.

Noter que l'expérience a été reproduite avec des électrons et a donné exactement le même résultat. Mais la plaisanterie ne s'arrête pas là, car si on s'amuse à observer le phénomène avec un instrument de mesure, le comportement du photon redevient corpusculaire ; le photon décide de ne passer que par une seule fente, comme s'il savait qu'il était observé.

On voit bien que la matière subatomique se comporte plus comme une entité mathématique (les matrices d'Heisenberg) que comme un objet préhensible. Ceux qui ont accès aux équations de la physique quantique le savent bien.



*Nota : L'expérience (dite de Young) a été réalisée au départ avec des photons, puis au fil des progrès techniques, avec des électrons, puis avec des protons, puis avec des atomes complets. Il faut savoir qu'aujourd'hui, on sait reproduire parfaitement cette expérience avec des grosses molécules... Ceux qui pensent que la physique quantique ne concerne que le monde subatomique vont peut-être avoir des surprises.*

### **Le principe de correspondance :**

Le principe de correspondance énoncé par Bohr dès 1916, revu et corrigé par Paul Ehrenfest (physicien autrichien 1880-1933) en 1927, jette un pont entre la physique classique et la physique quantique. Quand le nombre de particules atteint un certain seuil, la théorie quantique conduit au mêmes résultats que la physique classique. Mais cette apparente assimilation est trompeuse. En vérité, la physique classique se révèle n'être que le cas limite de la physique quantique. Qui plus est, des systèmes macroscopiques comme les supraconducteurs ou les superfluides persistent à suivre les lois incongrues de la physique quantique. Les travaux récents de Nicolas Gisin de l'université de Genève sur les objets macroscopiques en sont une autre confirmation

### **La bagarre Einstein / Bohr :**

Le problème d'une réalité objective existant ou non en dehors de l'observation, va créer un profond désaccord entre Einstein et Bohr.

Pour Bohr, conforté par les équations de Schrödinger et d'Heisenberg, l'électron n'a une position et une vitesse qu'au moment où il est observé (ce qu'on appelle « la réduction du paquet d'ondes ») ; en dehors de l'observation, la fonction d'onde décrit l'électron comme si il était « étalé » dans toute une zone de l'espace, et comme si il nous indiquait les différentes probabilités de sa présence en tel ou tel endroit de la zone.

Si on prend par exemple, l'atome d'hydrogène on peut imaginer une sorte de sphère diffuse autour d'un noyau central (le proton), où, dans l'état fondamental de l'atome, l'électron serait près du noyau et, en revanche, se « diluerait » dans cette sphère, dans les états excités de l'atome ; diminuant proportionnellement son énergie cinétique.

Observons au passage le caractère quasi virtuel de la chose, même si la fonction d'onde en confirme la réalité mathématique.

Einstein en revanche, refuse d'abandonner l'idée d'une réalité physique existant indépendamment de toute observation. Il pense que la théorie est incomplète et qu'il existe sûrement ce qu'il appelle « des variables cachées ».

Ce désaccord devient patent lors de la conférence « Solvay » de 1927 où deux courants vont s'opposer au fil des années : le courant Einstein et le courant orthodoxe ( Bohr, Heisenberg..) . appelé aussi « école de Copenhague »

Nous savons aujourd'hui, depuis l'expérience d' Alain ASPECT, que les variables cachées n'existent pas.

*Note sur la réduction du paquet d'ondes : Entre deux observations, la fonction d'onde qui décrit le quanton, obéit rigoureusement à l'équation de Schrödinger. Mais lors de l'observation, cette équation cesse brutalement d'être valable, et la fonction d'onde se réduit à l'une des possibilités qu'elle décrit. C'est ce que les physiciens appellent la « décohérence » Une fois l'observation faite, la fonction d'onde évolue pour recadrer avec l'équation de Schrödinger.*

### **Le paradoxe EPR :**

Le différent Einstein / Bohr va se concrétiser en 1935 avec la publication d'un article signé par Einstein et deux de ses collègues Boris Podolsky et Nathan Rosen (d'où le sigle EPR). Cette critique ( plutôt que paradoxe) fait remarquer que la théorie quantique prédit des corrélations entre deux particules distantes qui s'établissent de manière spontanée. Pour le créateur de la théorie de la relativité construite sur le principe que rien ne peut aller plus vite que la lumière, une telle prédiction ne peut être qu'un artefact d'une théorie incomplète.

Ce phénomène appelé « non-localité » aurait été considéré comme absurde par la physique classique. Il fait appel à une notion troublante : « l'intrication quantique » qu'il nous faut définir même sommairement.

L'intrication quantique est un phénomène observé en mécanique quantique dans lequel l'état quantique de deux objets  $S_1$  et  $S_2$  doit être décrit globalement, sans pouvoir séparer un objet de l'autre. Lorsque deux systèmes sont placés dans un état intriqué, il y a des corrélations entre les propriétés physiques observées des deux systèmes qui ne seraient pas présentes si l'on pouvait attribuer des propriétés individuelles à chacun des deux objets  $S_1$  et  $S_2$ . En conséquence, même s'ils sont séparés par de grandes distances, les deux systèmes ne sont pas indépendants et il faut considérer  $\{S_1+S_2\}$  comme un système unique ( non factorisable).

L'intrication quantique a un grand potentiel d'applications dans les domaines de l'information quantique, tels que la cryptographie quantique, la téléportation quantique ou l'ordinateur quantique. Les corrélations prédites par la mécanique quantique, et observées dans les expériences, montrent que la nature n'obéit pas au principe du « réalisme local » d' Einstein, selon lequel les propriétés observées d'un système, bien définies avant toute mesure, sont attribuables à ce système et ne peuvent changer que par interaction avec un autre système.

La controverse EPR a laissé les physiciens dubitatifs pendant plus de 30 ans. En effet, le fait d'agir sur l'un des quantons provoque instantanément la même action sur l'autre, même si nos deux quantons sont séparés par un mètre, un kilomètre ou une année-lumière.

On comprend qu'Einstein et ses partisans (de Broglie, Schrödinger) aient eu tant de mal à avaler cette « couleuvre » de « non-localité » et que pour eux, la seule hypothèse acceptable, (sous réserve de la découverte de variables cachées), était que les particules avaient l'information avant leur départ. Certains y ont même vu des effluves de métaphysique ou de philosophie puisque le concept d'espace semblait remis en question.

### **Les inégalités de Bell :**

L'argument EPR va ressortir du bois dans les années 60 pour se rapprocher du laboratoire grâce aux travaux du physicien irlandais John Stewart Bell (1928-1990).

Bell, persuadé qu'Einstein avait raison, va mettre au point une relation applicable au laboratoire, appelée « inégalités de Bell »

Ces inégalités sont des relations quantitatives que doivent vérifier les corrélations de mesures entre systèmes qui respectent totalement la causalité relativiste. Si ces inégalités sont violées, alors il faut admettre des influences instantanées à distance.

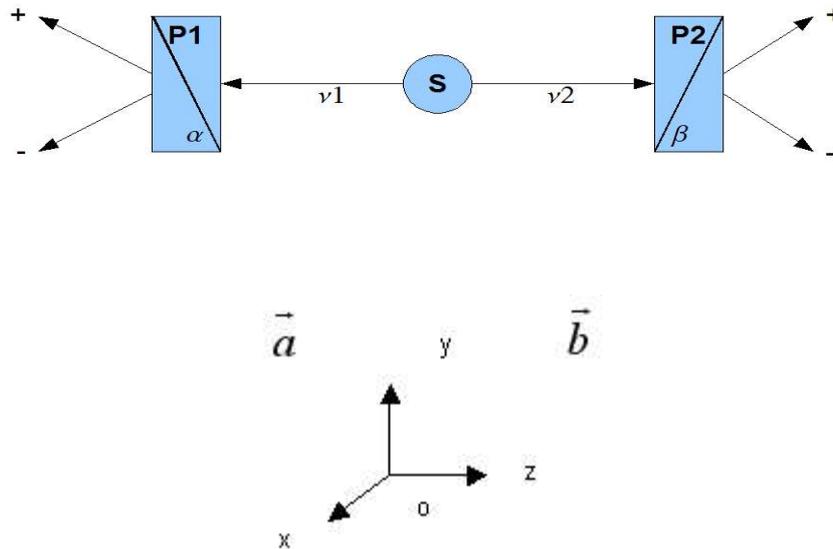
Ces inégalités devaient permettre la réalisation d'expériences EPR. Mais en 1964, les moyens techniques étaient insuffisants pour mettre en place concrètement ce type d'expérience.

La première expérience a été réalisée en 1972 à Harvard avec un résultat heureux pour Bell mais négatif pour la physique quantique : Elle ne violait pas les inégalités de Bell. En revanche, la même expérience réalisée à Berkeley mettait en évidence une violation des inégalités de Bell et donc, une confirmation pour la physique quantique. En fait, le peu de fiabilité des intrications réalisées condamna au rebut les deux expériences. Une autre expérience mise au point en 1976 à Houston, bien que montrant une fois plus une violation des inégalités de Bell, ne convainquit pas plus ses auteurs, du fait d'incertitudes provoquée par des éléments parasites.

L'éclaircie vint en 1981 suite aux travaux d'un physicien français, devenu depuis mondialement connu, pour l'expérience qui porte son nom : **Alain Aspect**

Mais voyons d'abord ce qu'il fallait contester

## Expérience de la relation des inégalités de Bell (ou expériences EPR):



Le schéma ci-dessus représente le schéma de principe à partir duquel John Bell a démontré ses inégalités : une source de photons intriqués S émet simultanément deux photons «v1»et «v2» dans deux directions opposées selon oz, dont la polarisation est préparée de telle sorte que le vecteur

d'état de l'ensemble des deux photons soit :  $\Psi (v1,v2) = \frac{1}{\sqrt{2}} ( |x, x\rangle + |y, y\rangle )$  (1)

$|x, x\rangle$  représentant la polarisation des deux photons selon l'axe des x (polariseur horizontal) et  $|y, y\rangle$  représentant la polarisation des deux photons selon l'axe des y (polariseur vertical).

*Notes :1) s'il est facile de se représenter les états individuels comme décrits ci-dessus, nous devons admettre sans le justifier, qu'il s'avère impossible de se représenter l'état global de la (relation1).*

*2) Les parenthèses (i,i) doivent être interprétées comme la notation mathématique spécialisée dite « bra-ket » inventée par Paul Dirac, qui est un standard de notation destiné à décrire les états quantiques dans un espace de Hilbert.*

P1 et P2 sont, justement ces polariseurs qui peuvent tourner sur leurs axes selon les angles  $\alpha$  (selon le vecteur unitaire « a ») pour P1 et  $\beta$  (selon le vecteur unitaire « b ») pour P2.

Derrière chaque polariseur se trouve 2 détecteurs qui sont symbolisés par + ou - , selon que le photon a été détecté ou pas.

La mécanique quantique prédit que :

- la probabilité d'avoir un + selon l'orientation « a » = la probabilité d'avoir un - selon l'orientation « a », soit  $(Pr + (a) = Pr - (a) = \frac{1}{2})$  (2a)
- la probabilité d'avoir un + selon l'orientation « b » = la probabilité d'avoir un - selon l'orientation « b », soit  $(Pr + (b) = Pr - (b) = \frac{1}{2})$  (2b)

Nous nous intéressons à présent aux probabilités  $Pr_{\pm\pm} (a , b)$  de détection conjointe de v1 et v2 dans les canaux + ou - des polariseurs P1 ou P2, orientés suivant a et b (angles  $\alpha,\beta$ ).

Dans ce cas la prédiction quantique s'écrit :

- $Pr_{++} (a,b) = Pr_{--}(a,b) = \frac{1}{2} \cos^2 (\alpha,\beta)$
- $Pr_{+-} (a,b) = Pr_{-+} (a,b) = \frac{1}{2} \sin^2 (\alpha,\beta)$  (3)

### Corrélations:

Considérons d'abord la situation particulière,  $(a , b) = 0$ , où les deux polariseurs sont parallèles. La prédiction quantique pour les probabilités conjointes (équations 3) s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{Pr } ++ (a,a) &= \text{Pr } -- (a,a) = \frac{1}{2} \text{ car le cosinus de } 0 = 1 \\ \text{Pr } +- (a,a) &= \text{Pr } -+ (a,a) = 0 \text{ car le sinus de } 0 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

D'après ce résultat, lorsque le photon  $v_1$  est trouvé dans le canal + du polariseur P1, alors on est certain de trouver  $v_2$  dans le canal + de P2 (et de même pour les résultats -). Ainsi, pour des polariseurs parallèles, les résultats de mesure de polarisation sur  $v_1$  et  $v_2$  sont totalement corrélés et ceci quelque soit la direction a des polariseurs.

Pour caractériser quantitativement le degré de corrélation entre quantités aléatoires, on utilise le coefficient de corrélation. Pour les mesures de polarisation considérées ici, il s'écrit :

$$\text{Cor } (a,b) = \text{Pr } ++ (a,b) + \text{Pr } -- (a,b) - \text{Pr } +- (a,b) - \text{Pr } -+ (a,b) \quad (5)$$

En reportant dans cette définition les prédictions quantiques (3), on obtient un coefficient de corrélation de polarisation :

$$\text{Cor } (a,b) = \cos \{ 2 (a,b) \} \quad (6)$$

En conclusion, les prédictions quantiques suggèrent que, malgré le caractère apparemment aléatoire des résultats individuels, il y a une corrélation entre ces résultats aléatoires. Cette corrélation est caractérisée par l'équation (6). Pour des polariseurs parallèles (ou perpendiculaires), la corrélation est totale (  $\text{Cor} = +/-1$ ).

#### Paramètres supplémentaires :

Pour reprendre l'idée d'Einstein supposant que les photons ont acquis avant leur départ des propriétés communes, Bell introduit des paramètres supplémentaires (variables cachées). Pour une paire donnée, caractérisée par un paramètre supplémentaire,  $\lambda$ , les résultats de mesures sont donnés par des fonctions qui vont déterminer les valeurs +1 ou -1 :

- Fonction  $A (\lambda , a) = +/- 1$  au polariseur P1 (orientation a)
- Fonction  $B (\lambda , b) = +/- 1$  au polariseur P2 (orientation b)

En considérant une quantité « Q », combinaison de quatre coefficients de corrélation, associés à deux directions d'analyse pour chaque polariseur ( a et a' pour le polariseur P1, b et b' pour le polariseur P2), on peut écrire  $Q = A (\lambda,a) \cdot B (\lambda,b) - A (\lambda,a) \cdot B (\lambda,b') + A (\lambda,a') \cdot B (\lambda,b) + A (\lambda,a') \cdot B (\lambda,b')$

$$\text{Soit: } Q = A (\lambda,a) [ B (\lambda,b) - B (\lambda,b') ] + A (\lambda,a') [ B (\lambda,b) + B (\lambda,b') ] \quad (7)$$

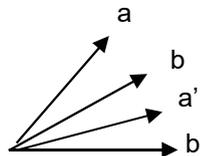
Sachant que les fonctions A et B ne peuvent prendre que des valeurs + 1 ou -1, on voit que (7)

$$\text{devient : } Q = (\lambda,a,a',b,b') = +/- 2 \quad (8)$$

La moyenne sur  $\lambda$  des quantités, Q, est donc comprise entre -2 et +2.

#### Conflit avec la mécanique quantique :

Exemple : Dans la configuration :  $a-b = b-a' = a'-b' = 22^\circ 5'$  soit  $+/- \frac{\pi}{8}$



En utilisant l'équation (6), ( $\text{Cor } (a,b) = \cos \{ 2 (a,b) \}$ ) de la mécanique quantique orthodoxe, on trouve

$$Q = 2\sqrt{2} \text{ soit environ } 2.82, \text{ bien supérieur à } 2. \text{ ou } Q = -2\sqrt{2} \text{ pour } \frac{3\pi}{8} \text{ soit bien inférieur à } -2.$$

### **L'expérience d'Alain Aspect :**

L'inégalité de Bell dépend d'un postulat selon lequel, il n'y a aucune raison pour que le fonctionnement de la source dépende de l'orientation des polariseurs P1 et P2. Si ce postulat n'est pas vérifié, notre démonstration n'a plus de valeur. Et après tout, pourquoi n'existerait-il pas une force d'interaction inconnue, entre les détecteurs et la source ou autre bizarrerie.

Néanmoins, dans tous les cas, cette supposée interaction devrait respecter le postulat selon lequel rien ne peut aller plus vite que la lumière.

Or, si on peut changer l'orientation des polariseurs très vite après que les photons ont quitté la source, d'une part, on aura éliminé l'influence possible de ces orientations sur la source, d'autre part, les appareils ne pourront communiquer entre eux avant que les photons ne les aient atteints.

C'est ce qu'a réalisé Alain Aspect en 1982 en intercalant un dispositif d'aiguillage extrêmement rapide (100 millions de changement d'orientation par seconde) Ainsi le temps mis par le photon pour aller de la source à un polariseur distants de 6.5 m était deux fois plus long qu'un changement d'orientation.

Conséquence : Le lien hypothétique de la source aux détecteurs était brisé.

L'expérience a été réitérée à Innsbruck en 1998 avec des distance de 400m et du matériel encore amélioré. La violation des inégalités de Bell est confirmée une fois de plus réglant définitivement le conflit Einstein / Bohr à l'avantage du dernier.

Conclusion : Même si personne ne comprend pourquoi, les physiciens du monde entier ont dû se rendre à l'évidence que deux particules intriquées ont instantanément le même comportement acquis seulement au moment de leur mesure quelque soit la distance qui les sépare, c'est à dire 1 mm, 1m, 1 km... 1 milliard d'années-lumière ...remettant en cause la notion même d'espace ...et de temps.

### Supplément gratuit :

En 2012, dans les locaux de l'université de Genève, le Groupe de Physique Appliquée (GAP) dirigée par Nicolas Gisin, physicien connu pour son livre « l'impensable hasard » a réussi à intriquer un milliard d'atomes dans chacun de deux cristaux de la taille d'un morceau de sucre. Il s'agit d'Ytterbium (Yb) et de néodyme (Nd) du groupe des terres rares. (voir science et avenir de mars 2013)

### **La superposition d'état :**

Un autre aspect intrigant de la mécanique quantique est sans aucun doute l'existence de superpositions d'états. L'état quantique contient toute l'information sur un système. Il décrit, par exemple, un atome préparé dans un niveau d'énergie bien défini ou un électron localisé à une certaine position dans l'espace. La mécanique quantique est une théorie linéaire. Cela signifie que toute somme (toute combinaison linéaire) d'états possibles est aussi un état possible. Un état quantique peut donc décrire un atome qui est à la fois dans deux niveaux d'énergie, un électron qui est localisé à la fois en deux positions distinctes. L'existence de ces " états de superposition " apparaît clairement dans les interférences quantiques, des " fentes d'Young " vues plus haut ; réalisée depuis peu avec des atomes, l'atome " suit " en fait simultanément deux chemins dans l'appareil, entre source et détection, et la probabilité de le détecter à tel endroit ou tel autre révèle cette " superposition ".

### Le chat de Schrödinger :

Donnons ci-après une des multiples versions de ce célèbre « paradoxe »

Imaginons une boîte étanche, ne subissant aucune influence de l'extérieur avec un chat placé à l'intérieur. Un flacon contenant du poison mortel est relié à une cellule photoélectrique. L'événement quantique est la mise en marche d'une cellule photoélectrique par un photon. Le photon, issu d'une source lumineuse se reflète sur un miroir semi-réfléchissant . La réflexion sur le miroir coupe donc la fonction d'onde du photon en 2 parties, l'une d'elle est réfléchi par le miroir et va droit sur la cellule photoélectrique qui provoque la chute du poison et la mort du chat. L'autre partie de la fonction d'onde est transmise à travers le miroir sur le mur, et le chat reste vivant. Si nous nous plaçons du point de vue d'un observateur à l'extérieur de cette boîte, pour lui aucune mesure n'a été faite. L'évolution de l'état quantique du système n'est autre qu'une superposition d'alternatives jusqu'à l'échelle du chat. (équation de Schrödinger). Les deux alternatives sont donc présentes et de même poids. Donc pour l'observateur à l'extérieur, le chat est dans une superposition d'états, mort et vivant en même temps.

En utilisant la notation bra-ket de Paul Dirac, on pourrait écrire quelque chose comme :

$$\text{Fonction d'onde } \Psi(r) \text{ du chat} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\lambda_1 \text{ chat vivant}) + (\lambda_2 \text{ chat mort})$$

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$  étant deux nombres complexes attachés aux vecteurs « chat vivant » et « chat mort ».

Max Born en 1927 complète la théorie en montrant que  $|\Psi(r)|^2$  = probabilité de trouver le chat dans un état déterminé.

Tout cela serait parfait si l'interaction des systèmes macroscopiques avec leur environnement ne brouillait pas très rapidement les superpositions d'état, d'autant plus vite que le système est plus grand.

On peut d'ailleurs utiliser d'autres métaphores plus ou moins convaincantes comme celle du dé: Un dé en polystyrène soumis à un jet d'air puissant tourne aléatoirement dans tous les sens à l'intérieur d'une boîte opaque, dont une des faces a la particularité de devenir transparente lorsqu'un organe de visée (par exemple un œil) se trouve strictement perpendiculaire à une des faces du dé. Autrement dit, selon la position du dé, on voit soit un 1, soit un 2, soit un 3, soit un 4, soit un 5 ou soit un 6 .

L'équation d'onde totale du dé est donc la somme des valeurs de 1 à 6 , en quelque sorte en état de superposition.

En fait, on ne fait que réaliser ce que les physiciens quantiques appellent une réduction du paquet d'ondes, découlant systématiquement de toute observation d'un phénomène quantique.

Richard Feynman ne disait-il pas que sa méthode de calcul consistait à faire « la somme de toutes les histoires possibles »

### **Conclusion :**

Ce petit « mémoire » n'a pas la prétention d'être autre chose qu'un simple tour d'horizon des principaux aspects de la physique quantique et des aberrations qu'elle semble engendrer. Mais n'oublions pas que, malgré son apparente extravagance, cette théorie est vérifiée tous les jours par l'expérience avec une précision de l'ordre de  $10^{-10}$ . (l'équivalent d'1/10.000 de micron sur 1m).

Imaginez ce que serait notre monde technologique d'aujourd'hui sans ce « mini-big-bang de savoir » que nous ont offert les Planck, Bohr, Einstein, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Bell, etc. et tous ceux actuellement en exercice qui continuent d'affiner la théorie, comme Alain Aspect, Etienne Klein, notre prix Nobel Serge Haroche et bien d'autres

Imaginez une seconde un monde sans les puissants moyens de transmission actuels, sans téléguidage aérien, sans ordinateur, sans téléphone portable, sans télévision, sans GPS, sans les sensationnels moyens d'imagerie médicale du corps humain que sont les scanners, IRM, TEP , ....tout simplement sans électronique et encore plus en avant.... sans transistor... Imaginez la taille d' un Ipad dont les « bits » seraient générés par des relais électromagnétiques.

Disons pour finir, que la physique quantique n'a pas seulement transformé notre existence ; elle a aussi permis de compléter certaines théories comportant encore des zones d'ombre, et parfaire des disciplines complètes comme la chimie.