



La physique quantique

ADMETTRE LE HASARD

On a coutume de dire que la physique a connu au xx^e siècle deux grandes révolutions. L'une, la relativité d'Einstein, a mis en cause les notions classiques d'espace et de temps ; l'autre, la physique quantique, a bouleversé le déterminisme en introduisant en physique le hasard pur. Entre l'acte de naissance de la physique des quanta en 1900 et aujourd'hui, près de cent ans se sont écoulés. De nombreuses questions ont été résolues et de nombreuses applications issues de cette nouvelle physique ont vu le jour. En effet, ordinateurs, lasers, horloges atomiques, applications nucléaires... mais aussi de très nombreux résultats théoriques allant de la cosmologie et l'infiniment grand de l'univers à l'infiniment petit dans le monde de la physique des particules. La physique quantique est réputée défier le bon sens et soulever de grandes questions philosophiques. **Richard Feynman**

(1918-1988), prix Nobel (1965) pour ses travaux en physique quantique déclarait même être sûr que personne ne comprenait vraiment la physique quantique.

ACTE DE NAISSANCE

La théorie quantique est née de la rencontre de la thermodynamique et de l'électromagnétisme à la fin du xx^e siècle. On s'intéressait à cette époque au rayonnement émis par un corps chaud, par exemple un morceau de fer chauffé au rouge. Plus précisément, les physiciens étaient à la recherche d'une loi permettant de rendre compte du spectre de rayonnement émis en fonction de la température du corps. On comprend que cette étude puisse mêler la thermodynamique et l'électromagnétisme... Problème : la mise en relation de ces deux pans de la physique aboutissait à une absurdité, car elle prévoyait une émission d'énergie infinie. En 1899, Max Planck (1858-1947) montre comment il est possible d'éviter ce problème. On peut sortir de l'impasse, dit Planck, si l'on admet que l'énergie échangée sous forme de rayonnement entre un corps chaud et un corps froid s'effectue de manière discontinue, discrète, de manière hachée... et non de façon continue. Formellement, cela

correspond à l'introduction d'une constante « h », appelée constante de Planck.

L'ACTION EN PHYSIQUE CLASSIQUE

L'action est une des grandeurs les plus fondamentales de la physique. Elle a été introduite en physique au $xviii^e$ siècle par Maupertuis puis précisée par la suite par **Euler**,



Lagrange et Hamilton. L'action possède les dimensions d'une énergie multipliée par un temps (attention, la puissance est une énergie divisée par un temps). Cette énergie correspond en mécanique newtonienne à la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle, différence que l'on a pris l'habitude d'appeler lagrangien, notée L . Le produit du lagrangien par le temps est appelé action. Maupertuis et ses successeurs montrent que l'action mise en jeu dans tout phénomène est toujours minimale ; par exemple, le chemin que suit une balle lancée en l'air est tel que sur ce parcours la quantité d'action est minimale. C'est le principe de « moindre action ». Comme sur ce trajet, la vitesse et la position de la balle changent à chaque instant, il en est de même de l'action instantanée. Ainsi, il faut faire la somme des actions instantanées entre le début et la fin du parcours pour trouver l'action totale.

MAX PLANCK ET LE QUANTUM ELEMENTAIRE D'ACTION

Planck montre que la grandeur « action » ne peut prendre une

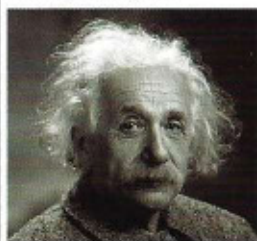


valeur arbitrairement petite. Il existe un minimum en dessous duquel la valeur de l'action ne peut descendre. Ce minimum est h , numériquement égal à $6,6 \cdot 10^{-34}$ joule.seconde. La constante h est donc bien un quantum élémentaire d'action ; en quelque sorte « l'atome d'action ».

Cela étant, bien qu'il existe un minimum d'action, l'action n'est pas quantifiée : elle peut prendre n'importe quelle valeur pourvu qu'elle soit plus grande que h . Cette découverte de Planck signifiait en fait que l'échange d'énergie s'effectuait par paquets ou quanta, mais n'impliquait pas que l'énergie était elle-même quantifiée.

ALBERT EINSTEIN ET LES QUANTA DE LUMIÈRE

En 1905, **Einstein** (1879-1955) montre que l'énergie du



rayonnement électromagnétique est morcelée en petits paquets d'énergie : les quanta d'énergie. On aboutit ainsi à l'idée que non seulement l'échange d'énergie par rayonnement est quantifié (Planck), mais le rayonnement lui-même est quantifié (Einstein). Une analogie permettra sans doute de mieux saisir ce point : on achète le lait par paquet de un litre, mais le lait lui-même n'est pas fourni par les vaches sous forme de blocs de un litre. Ainsi, le nombre de litres achetés est un nombre entier bien que le lait ne soit pas fondamentalement un objet discontinu. La discontinuité n'apparaît que dans l'échange avec le commerçant. En revanche, si le nombre de pommes achetées est entier, c'est bien parce que la pomme est un objet discontinu ; les arbres fournissent une pomme, deux pommes, trois pommes... Planck montre que l'échange d'énergie s'effectue comme le lait ; Einstein montre que l'énergie du rayonnement est constituée de « pommes ».

NIELS BOHR ET SON ATOME

En 1913, **Niels Bohr** (1885-1962) postule que les états d'énergie des



atomes sont quantifiés : l'énergie d'un atome excité (qui n'est pas dans son état fondamental d'énergie) ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. Entre un état A et l'état B qui le suit, il n'y a pas d'état intermédiaire. Dit autrement, cela signifie que seules certaines orbites électroniques sont autorisées. Ce modèle d'atome est appelé « atome de Bohr ». En somme, environ dix ans après la quantification de la lumière par Einstein, Bohr quantifie la matière.

LOUIS DE BROGLIE ET LES ONDES DE MATIÈRE

Avec la quantification de la lumière et de manière générale des ondes électromagnétiques, Einstein réintroduisait en physique la notion de corpuscule de lumière que les physiciens avaient pourtant abandonnée depuis le milieu du xx^e siècle, lui préférant la théorie ondulatoire. Aussi, on mit du temps avant de l'accepter : ce n'est qu'après 1925 que le terme photon a été forgé pour désigner ce corpuscule. On se trouvait alors face à un paradoxe : la lumière semblait présenter un caractère ondulatoire et un caractère corpusculaire. On parle de dualité onde-corpuscule. **Louis de Broglie** (1892-1987)



franchit un nouveau pas en 1924, en étendant cette dualité aux électrons et en fait à toute la matière. À tout

corpuscule de masse m et de vitesse v , il associe une onde de longueur d'onde λ , telle que $\lambda \cdot m \cdot v = h$. La mécanique ondulatoire venait de naître. Grâce à sa théorie, Broglie parvient à rendre compte des états d'énergie quantifiés de l'atome de Bohr. Pour Broglie, il y a d'une part un corpuscule, d'autre part une onde qui l'accompagne et qui guide le corpuscule : il y a onde et corpuscule. De manière imagée, il y a une vague et un surfeur. Le caractère ondulatoire de la matière, prévu par Broglie, est expérimentalement démontré par Davisson et Germer en 1927. Ils parviennent à diffracter des électrons.

ERWIN SCHRÖDINGER ET SON ÉQUATION

Le physicien autrichien Schrödinger (1887-1961) construit une interprétation personnelle des idées de Broglie en postulant que le corpuscule est l'onde. Il écrit pour l'électron l'équation de propagation de cette onde qu'il nomme ψ (lire psi) : c'est l'équation de **Schrödinger**. Dans la théorie de



Schrödinger, il n'y a plus de corpuscules, mais uniquement des ondes qui se propagent dans un espace abstrait dont le nombre de dimensions est égal à trois fois le nombre de corpuscules en jeu.

Cantique des quantiques

h
C'est le quantum élémentaire d'action.

$6,6 \cdot 10^{-34}$
Valeur de h , en joule.seconde.

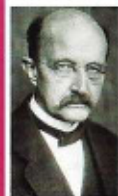
1900
Naissance de la physique des quanta.

1900
Planck quantifie les échanges d'énergie.

1913
Bohr quantifie la matière.

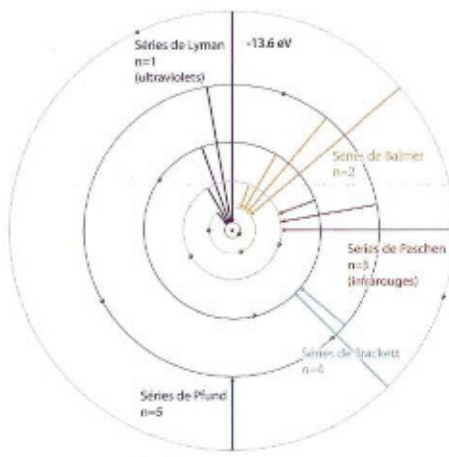
1924
Louis de Broglie invente l'onde de matière.

Max Planck



1858-1947

Atome de Bohr (hydrogène)



À l'aide de sa théorie, l'Autrichien parvient à résoudre de nombreux problèmes de physique atomique.

WERNER HEISENBERG ET LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Quelques mois avant que Schrödinger n'établisse son équation, l'Allemand **Heisenberg** (1901-1976) élabore une



autre théorie beaucoup plus abstraite que celle de Schrödinger, appelée « mécanique des matrices » ou encore « mécanique quantique ». Dans cette théorie, il n'y a non seulement aucun corpuscule, mais il n'y a même plus d'onde. Pour Louis de Broglie, Albert Einstein et quelques autres physiciens, la physique était en train de s'engager sur une mauvaise voie en devenant de plus en plus abstraite et formelle. En revanche, la mécanique des matrices reçoit le soutien de Bohr, Born, Pauli et de la majorité des physiciens. Pour cette école, plus connue sous le nom de l'École de Copenhague, l'onde de Schrödinger n'est pas une onde physique comme le soutient Schrödinger lui-même mais un élément purement statistique ; quant au corpuscule, il ne se trouve nulle part tant qu'il n'a pas été observé. Ce n'est pas l'avis de Broglie, qui comme Einstein, est persuadé que le corpuscule, sans être observé, existe et se trouve à chaque instant quelque part. Schrödinger montre que la théorie de Heisenberg et sa propre théorie sont en fait équivalentes.

MAX BORN ET L'AMPLITUDE DE PROBABILITÉ

Avec la naissance de la mécanique ondulatoire, les physiciens cherchent à donner un sens à l'onde de Broglie puis à l'onde de Schrödinger. Que dit la fonction ondulatoire ψ concernant le corpuscule ? Quelle est cette chose qui ondule ? Qui varie périodiquement ? En 1926, l'Allemand **Born** (1882-1970) en donne une interprétation, laquelle lie l'onde à une

probabilité. Plus précisément, Born dit que l'amplitude de l'onde élevée au carré donne la probabilité de trouver le corpuscule dans tel volume de l'espace. Ainsi, c'est le carré de l'amplitude de l'onde qui donne une probabilité. Cette amplitude, on l'appelle aussi « amplitude de probabilité » qu'il ne faut pas confondre avec la probabilité.

LES INÉGALITÉS D'HEISENBERG

En 1927, Heisenberg énonce ce que l'on appelle parfois les « principes d'incertitude » ou les « principes d'indétermination » qui portent son nom. De quoi s'agit-il ? Historiquement, Heisenberg imagine une expérience de pensée dans laquelle on cherche à mesurer la position et la vitesse d'un électron. Afin de déterminer sa position il est nécessaire que l'on éclaire l'électron, car dans le cas contraire, on ne le verra pas. Mais en tombant sur l'électron, la lumière va le bousculer légèrement et modifier sa vitesse. Afin de réduire cette perturbation, il faudra employer de la lumière de faible énergie, c'est-à-dire de grande longueur d'onde. Avec une grande longueur d'onde nous aurons une bonne précision sur la vitesse de l'électron, en revanche nous connaîtrons mal sa position car une grande longueur d'onde n'est pas adaptée à une mesure précise de la position. Il apparaît ainsi, grâce au « microscope de Heisenberg », qu'il ne nous sera pas possible de connaître simultanément avec une grande précision la vitesse et la position, car toute amélioration de la précision sur l'une des grandeurs amène fatalement une réduction de la précision de la mesure de l'autre. Formellement, cela se traduit par une inégalité faisant intervenir Δv et Δx , respectivement l'incertitude sur la vitesse et l'incertitude sur la position : $\Delta v \cdot \Delta x \geq h$. Cette relation montre bien que plus Δv est petit, plus Δx est grand, et inversement. C'est la raison pour laquelle on a appelé cette limitation « principe d'incertitude » ou « principe d'indétermination ». Cela dit, il faut être conscient qu'il ne s'agit nullement d'un principe, car cela se démontre mathématiquement de manière rigoureuse. Par ailleurs, ainsi que nous l'avons indiqué, la découverte de cette limitation est issue d'une expérience de pensée qui montre comment toute mesure implique perturbation. Cependant, la conception moderne de

cette limitation ne se focalise pas sur l'action perturbatrice de l'appareil de mesure, mais plutôt sur le fait que le corpuscule ne possède pas une vitesse et une position déterminées. De même que position-vitesse forme un couple auquel l'inégalité s'applique, énergie-temps forme un couple de ce genre, et angle-moment cinétique forme un troisième couple de ce genre, ce qui nous donne finalement trois inégalités de Heisenberg. Comme on peut le constater, le produit des membres d'un couple est homogène à une énergie multipliée par un temps, c'est-à-dire à une action.

GEORGE GAMOW ET L'EFFET TUNNEL

À la fin des années 1920, l'étude de la radioactivité et du rayonnement alpha aboutit à la découverte par **Gamow**



(1904-1968) de ce que l'on appelle « effet tunnel », un phénomène purement quantique. De quoi s'agit-il ? Prenons l'image suivante : une colline et une bille placée à gauche de la colline. En donnant un coup suffisamment intense à la bille, il est possible de la faire monter jusqu'au sommet de la colline d'où elle pourra ensuite dévaler le flanc droit. Ce dont nous pouvons être sûr, est que si nous sommes à gauche de la colline, c'est qu'elle est passée par le sommet. Partant du sommet et après avoir dévalé la pente, arrivée en bas, elle doit avoir une énergie cinétique au moins égale à celle qu'elle a gagnée lors de sa chute : appelons la E_{min} . La surprise est que l'on observe la bille avec une énergie cinétique inférieure à E_{min} ! Comment est-ce possible ? Tout se passe comme si, au lieu de passer par le sommet, la bille était passée par un tunnel pour atteindre le flanc droit ; ayant ensuite dévalé la pente depuis un point situé moins haut que le sommet, son énergie cinétique est inférieure à E_{min} . De manière analogue, on observe à la fin des années 1920 des particules alpha possédant une énergie inférieure au minimum qu'une telle particule devrait avoir en quittant un noyau atomique. Cet effet tunnel s'explique théoriquement grâce à la mécanique quantique nouvellement mise sur pied dans les années 1920. C'est George Gamow qui en donne l'explication.

PREMIÈRE APPLICATION DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'un des premiers domaines d'application de la mécanique quantique concerne la nucléosynthèse stellaire. Lorsqu'à la fin des années 1920, on découvre qu'une particule alpha ne possédant pas assez d'énergie est malgré tout capable de se séparer du noyau atomique auquel il appartient, les physiciens imaginent

l'effet inverse : une fusion au lieu d'une séparation. En effet, on était à cette époque persuadé que des réactions nucléaires de fusion ont lieu au cœur des étoiles. Mais cette supposition se heurtait à un problème majeur : la fusion semblait impossible en raison de la température au cœur des étoiles, trop faible d'un facteur mille pour obtenir la fusion. Si l'effet tunnel fonctionne dans un sens (séparation), il doit fonctionner dans l'autre sens (fusion), se disent les physiciens : même si l'énergie cinétique des noyaux d'hydrogène n'est pas suffisante pour les coller ensemble, la fusion a quand même lieu... grâce à l'effet tunnel.

LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Après la mise en place des fondements de cette nouvelle mécanique que l'on appelle « mécanique quantique », les physiciens se penchent sur l'extension de cette quantification aux champs. Cela passe par l'intégration de la relativité restreinte dans la mécanique quantique, ou mécanique quantique relativiste. Au cours des années 1940, Richard Feynman (1918-1988), Julian Schwinger (1918-1994) et Sin-itiro Tomonaga (1906-1979) parviennent à mettre sur pied la théorie quantique du champ électromagnétique, appelée électrodynamique quantique. Sur le même schéma, le champ nucléaire faible et le champ nucléaire fort sont par la suite quantifiés. Au cours des années 1960, le champ nucléaire faible et le champ électromagnétique sont unifiés dans la théorie quantique du champ électrofaible. Quant au champ nucléaire fort, sa quantification aboutit à ce que l'on appelle la chromodynamique quantique. Lorsque l'on s'intéresse à la théorie quantique des champs, on ne parle plus de « mécanique quantique » mais de « physique quantique ». À l'heure actuelle, seul le champ gravitationnel n'est pas quantifié. Certains espèrent que la théorie des cordes permettra de quantifier la gravitation.

L'EXPÉRIENCE EPR

Einstein était très hostile à la forme intrinsèquement probabiliste que la théorie quantique avait prise à la fin des années 1920 et à l'introduction de la notion de hasard pur en physique. Il imaginait donc des expériences de pensée qui permettraient de montrer que la théorie n'est pas satisfaisante, plus précisément qu'elle est incomplète. Il entre en débat avec Niels Bohr qui, lui, soutient le contraire. C'est dans ce contexte qu'Einstein et deux de ses collègues imaginent la très célèbre expérience de pensée EPR – Einstein, Podolsky, Rosen – que nous ne détaillerons pas ici, mais dont l'objectif était de montrer que la théorie quantique n'est pas tout à fait correcte. En 1964, John Bell (1928-1990) montre comment l'analyse des résultats expérimentaux permettrait de trancher en faveur d'Einstein ou en faveur de Bohr. En 1982, le groupe de Alain Aspect réalise l'expérience à Orsay. L'analyse des résultats montre que Bohr a raison. Ces expériences mettent en jeu deux particules dites « intriquées » :

elles sont « liées » de sorte que toute interaction avec l'une affecte instantanément l'autre quelle que soit la distance qui les sépare. Des expériences d'intrication ont été répétées depuis à de nombreuses reprises. C'est bel et bien Bohr qu'avait raison : la théorie quantique semble bien complète.

LE CHAT DE SCHRÖDINGER

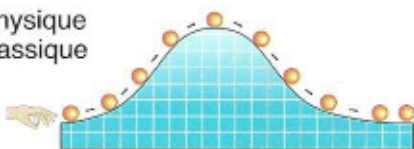
Dans le monde classique, un atome est dans un état E ou il ne l'est pas ; la pièce est côté pile ou côté face ; ou pour pousser la métaphore encore plus loin, le chat est mort ou vivant. Dans le monde quantique il est possible de créer des états dits « superposés » où l'atome sans être dans l'état E n'est pas non plus dans un autre ; la pièce n'est ni pile, ni face, le chat n'est ni mort, ni vivant. Autrement dit, l'état n'est pas déterminé. Par là, il ne faut pas comprendre qu'on ne connaît pas l'état, mais bien plus : il faut comprendre que le système est dans un état indéterminé ; il n'est pas dans un « état pur » ! Cet état n'étant ni pile, ni face, quel est-il donc ? Un état superposé ! Ce genre d'état n'existe pas en physique classique, laquelle ne connaît que les états purs.

LA COHÉRENCE DES ORDINATEURS QUANTIQUES

Comment se fait-il qu'atomes, électrons... se comportent chacun de manière quantique, mais un objet macroscopique constitué pourtant de ces particules n'ait pas, lui, un comportement quantique mais classique ? Cette question a hanté les physiciens depuis la naissance de la théorie quantique. Ce n'est que depuis une quinzaine d'années qu'une réponse satisfaisante semble se profiler. Les origines de cette réponse remontent au début des années 1970 : il s'agit de la théorie dite de « décohérence » proposée par Heinz Zeh. La décohérence a reçu ses premières confirmations expérimentales vers le milieu des années 1990. La question à laquelle la décohérence tente de répondre est celle-ci : comment se fait-il que les états superposés n'existent pas dans le monde classique ? Voici la réponse qu'elle apporte : un système n'est jamais isolé de son environnement ; les interactions avec l'environnement détruisent les états superposés. C'est cette destruction que l'on appelle décohérence. Si le système est limité à quelques atomes ou du moins s'il est très petit, il est possible de le maintenir isolé. Mais plus le nombre de particules qui le composent augmente, plus le nombre d'interactions augmente, et plus il devient difficile de maintenir le système dans un état superposé... Très vite la probabilité d'observer un état superposé tend vers zéro. Aussi, les systèmes macroscopiques appartiennent au monde classique. C'est notamment l'une des raisons pour lesquelles les ordinateurs quantiques censés employer non des états purs 0 ou 1 mais des états superposés semblent pour le moment relever de la science fiction...

Effet tunnel

Physique classique



Physique quantique

