

# *LA REPRESENTATION DE LA NATURE EN MECANIQUE QUANTIQUE*

*Par Anne Martini*

---

En physique classique, des grandeurs et des états physiques apparaissent comme des phénomènes constants, dont les principales caractéristiques (énergie, position, vitesse) sont des grandeurs continues. Au niveau atomique, il n'en est plus ainsi. La mécanique quantique est une théorie fondée sur les quanta. La théorie des quanta énonce ces conditions : « Les variations d'une grandeur physique ne se font que par des multiples entiers d'une unité plus petite, la constante de Planck (notée  $h$ ,  $h=6,626.10^{-34}$  J.s) ».

La quantification des grandeurs physiques n'est pas une idée nouvelle. Démocrite postula, déjà au IV<sup>ème</sup> siècle av. J-C., que la matière se partage en corps insécables : les atomes. De même, bien avant 1900, il avait été mis en évidence qu'une charge électrique apparaissait toujours comme un multiple entier d'une charge élémentaire.

## *1. Nécessité d'une nouvelle théorie*

### *1.1. Expériences mettant en jeu la lumière*

#### *1.1.1. Expérience d'interférences lumineuses*

Lorsqu'on éclaire deux fentes sources avec une lumière cohérente, on obtient des franges d'interférences. Les alternances de franges sombres et brillantes s'expliquent au moyen d'une théorie ondulatoire. Les franges proviennent de la différence de marche entre les faisceaux lumineux issus des deux fentes sources.

La lumière se comporte alors comme une onde.

#### *1.1.2. Effet photoélectrique*

Lorsqu'on éclaire la surface d'un matériau avec une intensité lumineuse appropriée, on observe une intensité de courant dans le matériau éclairé. Pour expliquer ce phénomène, il faut donner une interprétation corpusculaire de la lumière. La lumière est constituée de photons. Lors de l'interaction entre un photon et un atome, un électron peut se trouver arraché par le photon si celui-ci possède une énergie suffisante. La lumière se comporte comme un faisceau de particules appelées photons.

Ces deux expériences montrent que la lumière se comporte de manière très différente suivant l'expérience dans laquelle elle est mise en jeu.

### *1.2. Concept de complémentarité ou dualité onde-particule*

Si on examine le domaine atomique de manière expérimentale, la question est de savoir si c'est le caractère ondulatoire ou particulaire qui apparaît.

Dans les expériences précédentes, décrire la lumière comme une onde ou comme une particule sont deux concepts antagonistes ; en effet, l'onde est associée à des phénomènes occupant tout l'espace (elle est décrite par une amplitude en tout point à tout instant), alors qu'une particule est parfaitement localisée (son évolution peut être décrite en fonction du temps), les deux représentations du domaine microscopique s'excluent mutuellement.

On retrouve ce phénomène pour des faisceaux d'électrons. Par ex. un électron est manifestement une particule. Si pourtant un courant d'électrons pénètre dans un réseau cristallin, on peut observer un phénomène d'interférences comme seules les ondes peuvent le provoquer.

Ce paradoxe a longtemps divisé les physiciens.

Niels Bohr a tenté de concilier ces deux points de vue à l'aide du principe de complémentarité. « Les résultats obtenus sous différentes conditions expérimentales ne peuvent pas être compris par une seule image d'ensemble, mais doivent être considérés comme *complémentaires* en ce sens que c'est seulement la totalité des phénomènes qui rend exhaustive l'information possible sur les objets ». Pour Bohr, le principe de complémentarité est essentiellement un postulat sur l'impossibilité de résoudre des contradictions de la physique telles que le dualisme onde-particule.

## 2. Naissance de la mécanique quantique

### 2.1. Dualité onde-particule

Louis de Broglie réunit ces deux concepts (onde-corpuscule) grâce à une formule qui tient compte des deux comportements observés de la lumière : il relie un paramètre caractéristique de l'onde à un paramètre caractéristique de la particule par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad \lambda \text{ longueur d'onde de de Broglie}$$

paramètre caractéristique de l'onde

paramètre caractéristique de la particule ( quantité de mouvement de la particule)

La lumière et les particules élémentaires ne sont ni des ondes, ni des particules. On parle alors de dualité onde-corpuscule. On associe aux particules qui se déplacent des paquets d'onde. Ce sont des ondes localisées dans une région de l'espace. De cette représentation découle le principe d'incertitude d'Heisenberg.

### 2.2. Principe d'incertitude

En 1927, Werner Heisenberg (1901-1976) établit que le produit de certaines grandeurs physiques (couple de « variables conjuguées ») ne peut être connu avec précision. Il s'agit d'une *propriété* et non d'une imprécision due à des mesures. Des relations, sous forme d'inégalités, expriment cette propriété.

➤ Relation position-quantité de mouvement

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq h$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq h$$

avec  $x, y, z$  : coordonnées de la particule;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  : précisions avec lesquelles ces coordonnées sont connues  $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  : précisions avec lesquelles les coordonnées de la quantité de mouvement sont connues. Il est donc impossible de connaître avec précision simultanément la position et la quantité de mouvement d'une particule. Pour un objet classique, au contraire, position et quantité de mouvement peuvent être simultanément déterminées: alors  $\Delta x = 0$  et  $\Delta p_x = 0$ , en contradiction avec l'inégalité de Heisenberg.

➤ Relation énergie-temps

$$\Delta E \Delta t \geq h$$

avec  $\Delta E$  incertitude sur l'énergie de la particule;  $\Delta t$  incertitude sur la durée correspondante (par exemple durée de l'observation, temps de vie d'un état).

## 3. Théorie de la mécanique quantique

Chaque théorie élaborée sur le domaine atomique doit tenir compte de cette complémentarité sans contradictions. Cela fut permis en 1926, grâce à Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger. Tous deux développèrent des théories différentes de la mécanique quantique dont les résultats concordent cependant. Schrödinger développa son étude à partir des ondes et aboutit à l'aspect particulaire de la matière et de la

lumière. Heisenberg par contre, partit de la notion de particule. A eux deux, ils réussirent à donner une formulation cohérente de la dualité onde-particule.

### 3.1. Mécanique ondulatoire

Une fonction appelée *fonction d'ondes* (notée  $\Psi$ ) décrit les états d'une particule ou d'un système physique.  $\Psi$  dépend de la position et du temps. Elle n'a pas de signification évidente, mais elle permet cependant de déterminer des probabilités sur la position et sur d'autres grandeurs du système décrit.  $\Psi$  intervient dans l'équation de Schrödinger, dont les solutions décrivent le comportement d'un système physique. L'équation de Schrödinger, pour une seule particule, est :

$$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(r) \Psi$$

avec  $i = \sqrt{-1}$  ;  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J.s}$  ;  $m$  : masse des particules ;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  opérateur

Laplacien ;  $\Psi$  fonction d'onde ;  $U(r)$  : potentiel dépendant de la position.

$\Psi$  n'a elle-même aucune signification dans la réalité, mais le carré de la valeur absolue de  $\Psi$ , donc  $|\Psi|^2$ , est la probabilité de présence de la particule ou du système de particules en un point précis de

l'espace. Comme la particule est présente quelque part dans l'espace, on a :  $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dx dy dz = 1$  *Condition de normalisation.*

On ne peut qu'exprimer une probabilité sur les propriétés d'une particule, par exemple sur sa position. Si par contre, on est en présence d'un système de nombreuses particules semblables, on peut effectuer des mesures caractérisant plus précisément le système.

Pour décrire correctement un système quantique, les grandeurs habituellement utilisées en mécanique classique (énergie, temps, vecteur position, vecteur vitesse...) ne suffisent pas. Il a fallu introduire quatre nombres quantiques pour décrire un système de manière quantique.

### 3.2. Nombres quantiques

#### 3.2.1. Origine des nombres quantiques

##### ➤ Moment cinétique

Le moment cinétique (noté  $\mathbf{L}$  des électrons) est  $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$ .  $\vec{r}$  est le vecteur position, et  $\vec{p}$  est la quantité de mouvement ou impulsion des électrons. En mécanique quantique, on lui associe un opérateur (dont la composante suivant  $x$  est :  $L_x = -i\hbar \left( \frac{\partial y}{\partial z} - \frac{\partial z}{\partial y} \right)$ ). Le carré de la valeur de  $\mathbf{L}$  est quantifié :

$L^2 = l(l+1)\hbar^2$ .  $l$  est le nombre quantique de moment cinétique.

##### ➤ Moment cinétique de spin

L'électron, en plus de son mouvement autour du noyau, possède un mouvement de rotation propre appelé **spin** caractérisé par son moment cinétique de spin (noté  $\mathbf{S}$ ).  $\mathbf{S}$  est quantifié. La valeur  $S$  de  $\mathbf{S}$  est :  $S^2 = s(s+1)\hbar^2$ .  $s$  est le nombre quantique de spin. Toutes les particules élémentaires, tous les atomes et toutes les molécules ont un moment cinétique de spin ou un moment cinétique total. Les particules avec un nombre quantique de spin 1/2 s'appellent des *fermions* (ex : électron, positron, proton, neutron). Ceux avec  $s = 0$  ou  $s = 1$  s'appellent des *bosons* (ex : photon, deutéron, particule  $\alpha$ , graviton). Les particules avec  $s > 2$  sont inconnues à ce jour. Dans un système de particules, il peut y avoir un couplage antiparallèle de spins. Le spin de l'électron est la cause du moment magnétique de l'électron et ainsi l'origine du ferromagnétisme.

Expérience de Stern et Gerlach. Otto Stern (1888-1969) et Walther Gerlach (1889-1979) prouvèrent, en 1927, l'existence du spin de l'électron. Ils firent passer un fin jet d'atomes d'argent à travers les lignes de champ d'un champ magnétique puissant et non homogène. Le rayon rencontrait finalement une plaque de verre et se divisait en deux rayons distincts. L'électron de valence des atomes Ag possède un nombre quantique de spin 1/2. Les moments cinétiques de spin des différents atomes d'argent se placent

parallèlement ou anti-parallèlement aux lignes du champ magnétique. Le rayon se divise. Un jet d'atomes d'argent ionisés ne se divise pas.

S est mesuré directement par l'effet *Einstein et de Haas*.

### 3.2.2. Les nombres quantiques

- Le nombre quantique principal (noté  $n$ ) détermine le rayon  $r$  de l'orbite de l'électron. En effet,  $r$  croît à peu près proportionnellement à  $n^2$ . Il définit la *couche électronique*. Les électrons avec  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  s'appellent respectivement les électrons de la couche K,L,M,O,P,Q.
- Le nombre quantique secondaire ou azimutal (noté  $l$ ) est une mesure du moment cinétique orbital de l'électron. L'énergie d'un état avec  $n$  donné est proportionnelle à  $l$ .  $l$  peut prendre les valeurs  $0, 1, 2, \dots, n-1$ . Les électrons avec  $l = 0, 1, 2, 3$  s'appellent respectivement les électrons des sous-couches *s,p,d,f...*
- Le nombre quantique magnétique (noté  $m$ ) quantifie la projection sur un axe du moment cinétique des électrons. Chaque sous-couche possède  $2l+1$  orbitales, c.-à-d. que  $m$  peut prendre les valeurs  $-l, -l+1, -l+2, \dots, -1, 0, +1, \dots, l-1, l$ .
- Le nombre quantique magnétique de spin (noté  $s$ ) est une mesure du moment cinétique de spin. Le moment magnétique de l'électron ne peut prendre que deux valeurs :  $+1/2$  et  $-1/2$ .

Le principe de Pauli a été formulé en 1925 par Wolfgang Pauli (1900-1958; prix Nobel en 1945). Ce principe est : « Deux électrons d'un même atome ne peuvent pas posséder quatre nombres quantiques identiques. ».

### 3.3. Résultats de la mécanique quantique

L'atome d'*hydrogène* est constitué d'un proton autour duquel se déplace un électron sous l'action de la force de Coulomb. La solution de l'équation de Schrödinger conduit à un nombre infini de valeurs discrètes d'énergie  $E_n$  ( $n=1$  correspond à l'état fondamental).

On ne peut pas parler d'orbites d'électrons dans l'atome d'hydrogène, au point de vue de la mécanique quantique car l'électron n'est pas localisable, à cause des relations d'incertitude. Pour  $n = 1$ , on obtient seulement une probabilité de présence de l'électron, à l'intérieur d'une enveloppe, en forme de sphère, avec des limites imprécises. Le rayon de l'orbite stationnaire est :  $a_0 = 5,292 \times 10^{-11}$  m (*Rayon de Bohr*).

## 4. Problèmes liés à la théorie quantique

### 4.1. Problème de la réalité

Est-ce que les entités de base de la physique, telles que les électrons, les photons, les atomes eux-mêmes existent indépendamment des êtres humains et de leurs observations ? Einstein croyait comme Planck que la tâche de la physique était de fournir une image de la réalité physique et se prononçait contre le renoncement de la mécanique quantique à remplir cette tâche. « La science n'est pas une collection de lois, un catalogue de faits non reliés entre eux. Elle est la création de l'esprit humain au moyen d'idées et de concepts librement inventés. Les théories physiques essaient de former une image de la réalité et de la rattacher au vaste monde des impressions sensibles. Ainsi, nos constructions mentales se justifient seulement si, et de quelle façon, nos théories forment un tel lien. » La définition de la physique donnée par Bohr diffère radicalement de celles de Planck, Einstein et Schrödinger. « Il est faux de penser que le but de la physique soit de trouver comment est faite la nature. La physique est seulement concernée par ce que l'on peut dire sur elle ». De même Heisenberg déclarait : « La particule élémentaire n'est pas une particule matérielle dans l'espace et dans le temps, mais seulement, d'une certaine manière un symbole grâce à l'introduction duquel les lois de la nature prennent une forme particulièrement simple. ».

### 4.2. Problème de la compréhensibilité

Est-il possible de comprendre la structure et l'évolution des objets et des processus atomiques en ce sens que l'on peut construire des modèles qui correspondraient à la réalité ? Born avait une opinion très pessimiste quant à la possibilité de comprendre le monde physique : « Nous avons atteint la fin de notre journée dans les profondeurs de la matière. Nous avons cherché le sol ferme et n'en avons trouvé aucun. Nous pénétrons au plus profond. L'univers devient plus turbulent, plus indéterminé et plus trouble. ».

Heisenberg avait une position similaire : « Presque tous les progrès de la science ont été payés par un sacrifice, pour presque chaque nouvelle réalisation intellectuelle, les concepts antérieurs ont dû être révisés. Ainsi d'une certaine façon, l'accroissement des connaissances a réduit la prétention de savant à comprendre la nature. ».

*Entre réalité et compréhensibilité :*

Heisenberg disait : « L'onde de probabilité de Bohr signifiait une tendance à quelque chose. C'était une version quantitative de l'ancien concept de *potentia* de la philosophie d'Aristote. Elle introduisait quelque chose se situant au milieu entre l'idée d'un phénomène et ce phénomène lui-même, une étrange sorte de réalité physique à égale distance entre la possibilité et la réalité. ». Heisenberg pensait que la physique théorique était essentiellement une création humaine dont le seul but était de prédire des résultats expérimentaux.

### *4.3. Problème de la causalité*

Est-il possible de formuler les lois de la physique de telle façon que l'on puisse attribuer au moins une cause à chaque effet observé ? Les adeptes de la mécanique quantique ont dû renoncer au principe de causalité. Pauli écrivait : « Dans un état donné d'un système, on peut en général faire seulement des prédictions statistiques sur les résultats de futures observations. Le résultat d'une seule observation, par contre, ne sont déterminés par aucune loi et par conséquent, ils sont sans cause. ». Bohr prend aussi une position négative sur le problème de la causalité : « Ce développement de la physique nous a obligés à changer radicalement notre attitude en face de la description de la nature. Ce qui met cela peut-être le plus clairement en évidence, c'est le fait que le principe de causalité, regardé alors comme fondement indiscutable de toute interprétation des phénomènes naturels, s'est révélé un cadre trop étroit pour embrasser les lois toutes particulières qui régissent les processus atomiques individuels ».

Ce principe de complémentarité a été contesté par de nombreux physiciens : Einstein, Ehrenfest, Schrödinger. Ils croyaient en une réalité objective, compréhensible par l'homme et en des lois causales. Einstein écrivait : « De ces maigres remarques, on peut conclure qu'il m'apparaît erroné d'admettre qu'une description théorique dépende directement des constats empiriques comme le sous-entend, par exemple, le principe de complémentarité de Bohr. ».

### *4.4. Conclusion*

Démocrite, Galilée furent plus ou moins punis parce que leurs conceptions scientifiques étaient en contradiction avec les références culturelles dominantes. Ce qui semble être le contenu arbitraire des théories physiques résulte des pressions sociales et des courants culturels dominants. Il arrive que cette conséquence soit claire et que le choix effectué par le physicien soit conscient, d'autres fois, il arrive que ce choix inconscient s'effectue au cours du processus d'induction sous-jacent. Paul Forman trouve « d'une éclatante évidence que les années qui suivirent la fin de la première guerre mondiale et avant même l'essor d'une mécanique quantique acausale, sous l'influence de « courant de pensée », de nombreux physiciens allemands, pour des raisons incidemment liées au développement de leur propre discipline, aient pris des distances ou aient répudié explicitement la causalité en physique. La pression de l'ambiance intellectuelle générale fut si forte que bon nombre de physiciens furent conduits à ardemment espérer, activement rechercher et volontairement embrasser une mécanique quantique acausale ».

## *5. La mécanique quantique, est-elle une théorie complète ?*

Les neutrons sont des particules instables qui se désintègrent en proton, électron et antineutrino. Les temps de désintégration varie de 100 s à 3 000 s. Pour ceux qui sont partisans d'une physique acausale, chacune des désintégrations est un processus spontané qui n'admet pas d'explication causale. La question sur les vies des systèmes instables demeure à jamais sans réponse, c'est une question non scientifique. Pourtant Einstein finit par admettre les succès de la mécanique quantique et il prit avec d'autres opposants à la mécanique quantique un point de vue différent. Ils pensent que notre connaissance n'est pas complète : il existe des variables cachées, cachées pour le moment, mais qui si elles existent seront mesurables. Elles rendront la mécanique quantique causale. Ceci a déjà été rencontré. Par exemple, la thermodynamique classique permet de prédire les propriétés de la matière à l'équilibre, mais n'explique pas les fluctuations thermiques, le mouvement brownien qui s'expliquent en tenant compte de la structure



atomique de la matière. La mécanique quantique serait une théorie valable pour décrire les propriétés moyennes de la matière.

## *ANNEXE :*

# *LES PARTICULES ELEMENTAIRES*

Les particules élémentaires sont certes les pierres de construction du monde, mais elles se décomposent souvent en d'autres éléments. Leur durée de vie moyenne s'étend de l'état stable à  $10^{-23}$  s. Elles se distinguent par leur nombre quantique et des grandeurs physiques différentes. Les principes de conservation et les règles de sélection déterminent le schéma suivant lequel elles vont se désintégrer. Les principes classiques de conservation comme ceux de la charge, de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique sont toujours valables. De nouvelles grandeurs comme les nombres de baryons et de leptons sont également conservées. Jusqu'au milieu des années 30, on connaissait six particules élémentaires: l'électron, le positron, le proton, le neutron, le neutrino et le photon. En 1935, Hideki Yukawa (prix Nobel 1949) prédit l'existence d'une nouvelle particule élémentaire, le *méson* et ouvrit ainsi la recherche à d'autres particules. Aujourd'hui, on en connaît des centaines. La particule élémentaire, imaginée par Yukawa, fut découverte en 1947 dans le rayonnement cosmique. La masse du méson  $\pi$  correspondait bien à celle calculée auparavant. Aujourd'hui, on fabrique des particules élémentaires dans les *laboratoires de physique des hautes énergies*. Les processus de fabrication reposent avant tout sur les chocs provoqués dans des accélérateurs de particules. Les particules élémentaires sont encore classées de manière empirique, d'après leur mode d'interaction. La *théorie du champ quantique*, un autre développement de la mécanique quantique, considère les particules associées à des forces décrites par un champ quantique.

Il existe quatre types d'interaction :

- Interaction forte associée aux mésons d'intensité relative 1
- Interaction électromagnétique associée aux photons d'intensité relative  $10^{-2}$
- Interaction faible associée aux bosons d'intensité relative  $10^{-13}$
- Interaction gravitationnelle associée aux gravitons d'intensité relative  $10^{-40}$

### *Les antiparticules*

Paul Dirac (1902-1984 ; prix Nobel en 1933), prédit en 1928 l'existence d'une particule élémentaire qui ne devait se distinguer de l'électron que par le signe opposé de sa charge, donc positive, et un moment magnétique inversé. En 1932, Carl Anderson (né en 1905; prix Nobel en 1936) observa ce positron.

Depuis, on connaît les antiparticules correspondant à presque toutes les particules élémentaires. Le symbole des antiparticules est la plupart du temps un trait horizontal au-dessus du symbole de la particule élémentaire correspondante. Exception: le positron ou antiélectron :  $e^+$ . Exemple: antiproton  $\bar{p}$ , antineutron  $\bar{n}$ . Si des particules élémentaires et des antiparticules correspondantes se rencontrent, elles s'annihilent et émettent toute leur énergie sous forme de photons ou en d'autres particules élémentaires.

Exemple: Quand un électron et un positron se rencontrent, ils émettent deux photons.

L'antimatière se compose uniquement d'antiparticules. Ce sont des physiciens de Novossibirsk qui ont produit pour la première fois, en 1970, le premier antihydrogène (un antiproton  $\bar{p}$  avec un positron  $e^+$  tournant autour).

### *Classification des particules élémentaires*

On distingue trois classes de particules élémentaires, suivant le type de leurs interactions. On les classe également par rapport à leur masse. Des lettres latines et grecques caractérisent les différentes particules élémentaires.

- Les photons sont des particules de l'interaction électromagnétique.

- Les leptons rendent possibles les interactions faibles. Il en existe 8, dont entre autres cet  $e^+$ . Les hadrons sont des particules avec des interactions fortes. La classification contient plus de cent particules élémentaires et se divise en trois sous-classes dont deux sont encore divisées en deux.
- Les baryons sont des particules élémentaires relativement lourdes avec des nombres de charges baryoniques valant +1 ou -1.
- Les mésons sont des particules élémentaires, relativement légères. Leur durée de vie moyenne est de l'ordre de  $10^{-5}$  s à  $10^{-10}$  s.

## Résonances

Les particules dont la durée de vie est extrêmement brève sont appelées résonances. On distingue les résonances baryoniques des résonances mésoniques. Les quarks sont, d'après une théorie présentée par Murray Gellmann et Zweig, en 1963, les constituants fondamentaux des hadrons. Il s'agit de particules dont la charge électrique n'est pas un multiple entier de la charge élémentaire  $e$ , mais au contraire  $(1/3)e$  ou  $(2/3)e$ . Actuellement, on distingue six différents quarks avec les noms et les symboles suivants :

*up (u)*, haut, *down (d)*, bas, *strange (s)*, étrange, *charm (c)*, charme, *bottom* ou *beauty (b)*, beauté et *top* ou *truth (t)*, sommet.

A chaque quark correspond un antiquark. Les baryons sont constitués de trois quarks, les mésons de deux. Exemple: Le neutron a la constitution suivante : *ddu*. Les trois charges  $-(1/3)e$ ,  $-(1/3)e$ ,  $+(2/3)e$  ont pour somme une charge résultante nulle.