

La mécanique quantique: Développement historique, diverses interprétations.

Franck LALOE

Directeur de recherches émérite au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS

AEIS, 4 mai 2015

Transcription : Michel Gondran et Jean Pierre Treuil

La mécanique quantique est l'une des plus grandes réussites de toute l'histoire des sciences. Ses prédictions ont été vérifiées dans un très grand nombre de cas, avec parfois une précision fantastique de 10^{-12} . Historiquement, la mécanique quantique s'est développée en plusieurs étapes distinctes, chacune d'entre elles impliquant des interprétations différentes, parfois opposées. Puis s'est dégagée une version dite standard, dans la ligne des travaux de von Neumann et de Dirac, qui généralement est celle présentée dans les ouvrages et enseignée. Mais de réelles difficultés conceptuelles subsistent. Nous sommes loin d'un consensus universel sur la meilleure façon d'interpréter la nature de la fonction d'onde, la mesure, etc... et leur relation (éventuelle) avec la "réalité physique". C'est pourquoi de nombreuses présentations et/ou interprétations de la mécanique quantique ont été proposées. L'exposé en décrira quelques unes : celle dite de Copenhague (Bohr) ; l'interprétation statistique (à laquelle on attache souvent le nom d'Einstein) ; également les trois interprétations non-standard les plus célèbres : dBB (de Broglie-Bohm), GRW/CLS (équation de Schrödinger stochastique), Everett (parfois dite "des mondes multiples").

L'exposé de Franck Laloë s'est déroulé en trois parties ; il a d'abord présenté un développement historique de la mécanique quantique, montrant comment les idées sont apparues ; puis il a soulevé les difficultés liées à la fonction d'onde ; enfin, il a développé quelques unes des principales interprétations. La principale question traitée : qu'est-ce donc vraiment que cette drôle de fonction d'onde ?

Il propose quatre livres de référence sur le sujet :

1. Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, Mc Graw Hill(1966), second edition (1989)
2. Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley (1974).
3. Olivier Darrigol, *From c-numbers to q-numbers : The classical analogy in the history of quantum theory* (Berkeley : University of California Press, 1992)
4. G. Bacchiagaluppi and A. Valentini, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge University Press (2009).

Il faut ajouter à ces ouvrages le dernier livre de Franck Laloë :

Comprenons nous vraiment la mécanique quantique ? EDP Sciences, CNRS Editions, 2011.

Les livres de Max Jammer ont joué un grand rôle pour lui sur la question des interprétations. Le livre de Bacchiagaluppi et Valentini est consacré presque entièrement au congrès Solvay de

1927, qui a été si essentiel dans l'histoire de la mécanique quantique. C'est la première traduction en anglais de la version française.

Apparition des idées. Un résumé historique

Franck Laloe dresse d'abord un rapide tableau des grandes étapes de l'aventure quantique, à travers les apports successifs, parfois complémentaires, parfois contradictoires, de plusieurs grands chercheurs.

Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg

Planck introduit en 1900 la constante qui porte son nom dans le cadre de la théorie du corps noir ; Einstein reprend l'idée au sérieux en 1905 en ré-introduisant (après Newton) les quanta de lumière. Le problème principal à l'époque était la compréhension de la stabilité de la matière. Niels Bohr répond en partie à la question en introduisant la quantification des orbites des électrons de l'atome, quantification permettant la stabilisation de ces orbites. Il est suivi rapidement par Heisenberg avec sa théorie des matrices. Ce n'est cependant pas une théorie très satisfaisante : les orbites des électrons sont stables... parce qu'elles sont stables.

de Broglie, Schrödinger: la mécanique ondulatoire

Arrivent ensuite de Broglie et Schrödinger, c'est l'étape ondulatoire. Ils montrent qu'il existe une équation d'ondes permettant d'expliquer pourquoi certaines orbites sont stables ; pour le dire rapidement, ces orbites correspondent aux valeurs propres de l'équation de l'électron autour du proton ; on revenait ainsi à un domaine, celui des ondes, bien étudié. Certes, on savait que les électrons étaient des particules, mais l'idée de Schrödinger était qu'ils étaient des paquets d'ondes. Cela paraissait séduisant, mais de très grosses difficultés sont apparues :

1. L'onde de Schrödinger ne se propage pas dans l'espace ordinaire, comme une onde électromagnétique ou sonore par exemple ; elle se propage dans l'espace des configurations, lequel est bien plus grand (3×10^{23} dimensions pour une mole de gaz).
2. Contrairement aux espoirs de Schrödinger (1926), les paquets d'ondes s'étalent, les particules se diluent dans l'espace ! Par exemple, dans une collision sur un potentiel central, la particule diffusée part dans toutes les directions à la fois, alors qu'en pratique on observe toujours une trajectoire après collision.

Malgré son intérêt, l'image - pour laquelle la matière est onde - ne fonctionne pas.

Synthèse: Interprétations de Copenhague et "standard"

Intervient alors l'étape de synthèse, la troisième étape. C'est d'abord Max Born qui propose la fameuse interprétation statistique et probabiliste de la fonction d'onde. Puis de nouveau Niels Bohr avec l'interprétation dite "de Copenhague". Enfin, Dirac et Von Neumann, qui mettent au point le formalisme moderne de la mécanique quantique, lequel correspond à la version dite "standard". Franck Laloe précise ainsi les apports des uns et des autres :

1. **M. Born** : interprétation probabiliste de la fonction d'onde (règle de Born)

2. **N. Bohr** (interprétation de Copenhague) : rôle essentiel de l'appareil de mesure ; nous n'avons pas directement accès à la réalité du monde atomique ; le langage ne permet de parler d'une expérience de physique qu'en termes macroscopiques, comme un tout indissociable (holisme) ; notion de complémentarité.
3. **Von Neumann** : formalisme mathématique (espace vectoriel, opérateurs, etc.) ; notion de vecteur d'état, généralisant celle de fonction d'onde (dans la suite, on parlera indifféremment de « fonction d'onde » ou de « vecteur d'état ») ; introduction du « postulat de réduction du paquet d'ondes (également appelé « postulat de projection du vecteur d'état » ou parfois « collapse ») : lors d'une mesure, la fonction d'onde saute brusquement de la valeur prévue par l'équation de Schrödinger vers une "valeur réduite" aléatoire, fixée par le résultat de mesure.
4. **Dirac** : présentation synthétique, écriture en termes de bras et de kets, notion de spin, etc.

Le problème de la mesure, avec la "réduction du vecteur d'état".

Un exemple, l'expérience de Stern et Gerlach

Cette expérience consiste à étudier la déviation d'un jet d'atomes d'argent dans un champ magnétique, orthogonal à la direction du flux. Elle est destinée à mettre en évidence et à mesurer, à travers des déviations de trajectoires, ce qui correspond en physique classique à un moment cinétique, lequel en mécanique quantique devient *le spin*. Franck Laloe ne nous présente pas l'analyse complète de cette expérience ; son but ici est simplement d'introduire la réduction du vecteur d'état.

Si le spin de l'atome est orienté vers le haut (état \uparrow), on observe, après son passage dans l'appareil, une déflexion de sa trajectoire vers le haut. Si le spin est orienté vers le bas (état \downarrow), la déflexion se fait vers le bas. Mais, comme le permet l'équation de Schrödinger, le spin peut être une combinaison linéaire de l'état \uparrow et de l'état \downarrow , avec des poids éventuellement différents pour chacun d'eux et variables dans le temps : c'est ce qu'on appelle en mécanique quantique une superposition cohérente des deux états. On ne trouve pas cependant pour un atome, dans une telle superposition, une déflexion intermédiaire entre celles observées dans les cas précédents, comme on pourrait s'y attendre. On obtient tantôt l'une, tantôt l'autre des deux déflexions observées précédemment, savoir celle obtenue pour l'état \uparrow et celle pour l'état \downarrow , lorsqu'ils sont pris isolément.

C'est pour expliquer de telles observations que Von Neumann introduit son postulat de réduction : il dit qu'à un certain moment (ce "certain moment" a entraîné de très nombreuses discussions), une "réduction" s'effectue ; cette dernière interrompt l'équation d'évolution de Schrödinger et ce, de façon instantanée. De la superposition initiale des deux états, une seule composante subsiste, l'autre disparaît.

Un autre exemple, avec Serge Haroche

Pour illustrer d'une autre manière la réduction du vecteur d'état, Laloë nous montre le résultat d'une expérience de Serge Haroche (S. Gleyzes, et al. *Quantum jumps of light recording the birth*

and death of a photon in a cavity, Nature 446, 297, 2007) mesurant en temps réel le nombre de photons dans une cavité. On obtient une suite de niveaux - d'abord à quatre photons, puis successivement à trois, deux, un, puis à zéro - tandis que l'équation de Schrödinger donnerait une décroissance continue du nombre moyen de photons. Cette expérience permet donc de voir se produire en temps réel la projection du vecteur d'état.

La chaîne de von Neumann

Dans l'exemple de Stern et Gerlach, la particule arrive dans un état superposé $c_1\uparrow + c_2\downarrow$, combinant l'état \uparrow avec l'état \downarrow , un peu comme la lumière en deux états de polarisation. Cette particule interagit avec le détecteur : si l'on considère que cette interaction vaut mesure - et que le postulat de réduction s'applique - la particule se retrouve dans l'un des états élémentaires de la combinaison ; il est naturel de penser - une action n'est jamais sans réaction - que le détecteur lui-même se retrouve dans un état différent selon le résultat de la mesure, autrement dit le "branchement effectué" : état $D\uparrow$ ou $D\downarrow$, selon que l'état de la particule est après réduction \uparrow ou \downarrow .
. *Considérons maintenant que le postulat ne s'applique pas.* Après l'interaction, on ne peut plus parler de l'état de la seule particule prise isolément, mais de l'état du couple [détecteur, particule], un état *intriqué* s'écrivant $c_1 |D\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + c_2 |D\downarrow\rangle|\downarrow\rangle$. La superposition inclut, non seulement les deux valeurs de spin, mais aussi les deux états du détecteur qui leur étaient associés. Mais alors pourquoi s'arrêter au détecteur ? Ce dernier est en effet lui-même en interaction avec le reste du laboratoire, et ce dernier avec le reste du monde,... Ainsi, dans une interaction, l'équation de Schrödinger prévoit-elle que le vecteur d'état se ramifie, et que cette ramification se propage de plus en plus loin. La superposition se propage jusqu'au monde macroscopique, dont l'unicité semble remise en question. Cette propagation est connue comme la régression (chaîne) infinie de von Neumann.

L'exemple le plus célèbre d'une telle superposition est le fameux chat de Schrödinger, qui construit un vecteur d'état avec une superposition d'un chat vivant et d'un chat mort. Schrödinger a introduit cette expérience de pensée comme un contre-exemple à l'idée de superposition, avec l'intention d'en montrer l'absurdité. .

Mais, qu'est-ce donc que cette drôle de fonction d'onde?

On conçoit donc que l'interprétation des postulats gouvernant l'évolution de l'état d'un système, malgré leurs immenses capacités de prédiction, suscite beaucoup d'interrogations :

1. comment se fait-il que l'on a deux postulats d'évolution pour le même vecteur d'état ? quelles sont alors les limites exactes de leurs domaines d'application respectifs?
2. d'où vient cette division entre système mesuré d'une part, appareil de mesure et observateur d'autre part ? Quelle sont les limites relatives de ces deux mondes?
3. quel est le statut du vecteur d'état ? Décrit-il la réalité physique elle-même, ou seulement notre connaissance de la réalité ? Dans le second cas, est-il juste l'équivalent d'une distribution classique de probabilités ?
4. si le vecteur d'état donne juste une information (interprétation aujourd'hui à la mode), sur quoi porte cette information ? Est-elle relative à l'observateur, ou universelle ?

5. jusqu'à quel point faut-il prendre au sérieux l'équation de Schrödinger ?
6. quand faut-il la quitter pour utiliser à la place le postulat de réduction de von Neumann ?
7. par quel processus s'arrête la régression infinie de von Neumann ?

Retour sur l'interprétation de Copenhague

Les interprétations de la mécanique quantique sont nombreuses, diverses, et se combinent entre elles. Le conférencier va nous présenter les plus marquantes. En préliminaire, il nous a rassurés ! Tout se passe bien dans les laboratoires ; ces questions d'interprétation sont sans impact pratique en ce qui les concerne et sur la vie de la recherche. Rares sont les expériences où l'on observe un système quantique unique, isolé, un ion par exemple. Généralement on observe des échantillons comprenant un grand nombre de systèmes individuels, et un calcul de valeur moyenne est parfaitement suffisant. On interprète alors comme en mécanique classique.

Dans les autres cas, les physiciens utilisent une règle de bon sens qui évite les questions : on casse « à la main » sans état d'âme la chaîne de von Neumann, quand elle devient « trop » macroscopique. Le « Shut up and calculate » de Feynman se révèle en fait une attitude extraordinairement productive ! Cela marche formidablement, mais laisse sur la faim.

Commençons par l'interprétation standard, celle dite de Copenhague. Notre conférencier a tenu à nous présenter à son propos un certain nombre de citations, émanant de ses inventeurs et partisans, puis de ses adversaires.

L'Interprétation de Copenhague

Dans la vision de Bohr, le vecteur d'état (fonction d'onde) à lui seul ne décrit pas la réalité physique. C'est par contre un outil de calcul qui est adapté. Nous ne pouvons parler de réalité physique que dans un langage qui s'applique à notre échelle : c'est-à-dire en prenant en compte l'ensemble du dispositif expérimental utilisé dans l'expérience, à savoir la préparation de l'objet à mesurer, l'instrument utilisé et la mesure.

Il n'y a aucun sens (il est interdit !) à tenter de distinguer des éléments physiques séparés au sein du système total. En particulier, c'est cette distinction qui fonde le raisonnement de Einstein, Podolsky et Rosen, lequel n'est donc pas pertinent dans le domaine quantique ; cela implique donc la non-séparabilité, la contextualité et la fameuse non-localité.

De quelques propos de ses partisans...

BOHR : « Il n'y a aucun sens à parler des propriétés physiques d'un système, sans faire référence aux appareils de mesure. Il n'existe pas de monde quantique. Il n'existe qu'une description physique abstraite. Il est faux de penser que la tâche de la physique est de découvrir comment la Nature est réellement »... « Il n'existe pas de concept quantique ... On ne pourra jamais observer un électron unique ».

HEISENBERG : « Les atomes ne sont pas réels ; ils forment un monde de potentialités ou de possibilités, plutôt qu'un monde de faits ».

DIRAC est plus nuancé : « Le seul objet de la physique théorique est de calculer des résultats qui peuvent être comparés avec l'expérience, il est tout à fait inutile de donner une description globale de l'ensemble du phénomène »

VON NEUMANN's : « Il est impossible de reproduire la mécanique quantique avec des théories à variables supplémentaires »

Le « **caveat** » de **van KAMPEN** : « Toute personne, qui attribuera au vecteur d'état plus que ce qui est nécessaire pour calculer les phénomènes observables, sera tenue pour seule responsable des conséquences!

FEYNMAN : shut up and calculate!

et de ses adversaires...

SCHRÖDINGER : « Le monde ne m'est donné qu'une seule fois, et pas une fois pour son existence et une autre pour sa perception. Le sujet et l'objet sont un. La barrière qui les sépare ne peut être considérée comme brisée, du seul fait d'une expérience en sciences physiques, pour la simple raison que cette barrière n'existe pas ».

EINSTEIN en 1936: « La fonction Psi ne décrit en aucune manière une condition attribuable à un seul système ; elle concerne en fait un grand nombre d'entre eux, un "ensemble de systèmes" au sens de la mécanique statistique... *ou encore...* si la fonction Psi ne fournit que des données statistiques sur les grandeurs mesurées...la raison en tient... au fait que la fonction Psi ne décrit d'aucune manière l'état du système unique.»

de **BROGLIE** : « L'interprétation de la Mécanique ondulatoire de Bohr et Heisenberg a de nombreuses conséquences, qui ouvrent des perspectives philosophiques nouvelles. Le corpuscule n'est plus un objet bien défini dans le cadre de l'espace et du temps; il n'est plus qu'un ensemble de potentialités affectées de probabilités ; il n'est plus qu'une entité qui se manifeste à nous de façon fugitive, tantôt sous un aspect, tantôt sous un autre. M. Bohr, qui est un peu le Rembrandt de la Physique contemporaine, car il manifeste parfois un certain goût pour le "clair-obscur", a dit des corpuscules qu'ils sont « *unsharply defined individuals within finite space-time limits* ».

BELL : « Le problème est le suivant: la mécanique quantique ne s'intéresse qu'aux observations. Elle divise donc nécessairement le monde en deux, une partie qui est observée et une autre qui effectue l'observation. Les résultats dépendent de la façon dont est faite cette division, mais aucune règle précise pour le faire n'est proposée. Tout ce dont nous disposons est une recette qui, du fait des limitations auxquelles sont sujets les humains, est suffisamment non-ambigüe pour toute question pratique ».

Notre conférencier clôt ce chapitre des critiques, en évoquant l'ambiguïté du postulat de réduction, ambiguïté dans l'expérience dite «de l'ami de Wigner» . A l'intérieur d'un laboratoire, Albert, l'ami de Wigner, réalise une expérience de Stern et Gerlach et trouve un vecteur d'état \uparrow . Il existe donc pour lui réduction du vecteur d'état. Mais, pour Wigner, à l'extérieur du laboratoire, - qui sait que l'expérience a été réalisée mais qui ne connaît pas le résultat - le vecteur d'état est toujours dans un état superposé. Ce n'est que lorsque son ami lui ouvre la porte et lui communique le résultat, que son vecteur d'état est réduit !

De quelques autres interprétations.

Notre conférencier aborde ensuite plusieurs interprétations, puis il développe particulièrement trois d'entre elles : celle de Broglie-Bohm, l'équation de Schrödinger modifiée et celle des mondes multiples.

Statistical interprétations (Einstein, Leslie E. Ballentine, etc.)

Le vecteur d'état ne décrit pas une réalisation unique d'une expérience, il ne peut décrire qu'un ensemble de réalisations de la même expérience. Cette interprétation se divise en deux sous catégories : les théories à variables supplémentaires comme la théorie de Broglie-Bohm ; les théories de ceux qui disent que la nature est ainsi et que l'être humain ne peut pas aller plus loin. Notre ami Roger Balian appartient à cette deuxième ligne de pensée.

Informationnelle (Peres, Parisi, Zeilinger, etc.)

Très populaires actuellement sont les théories informationnelles. Le vecteur d'état ne décrit pas le système physique lui-même, mais seulement l'information que nous avons sur lui. La réduction du vecteur d'état n'est qu'une mise à jour de l'information que nous possédons. Ce point de vue a repris aujourd'hui de l'importance sous l'influence de Chris Fuchs, avec ce qu'il appelle le Qubism (Chris Fuchs, David Mermin, etc.) et avec l'utilisation des probabilités bayésiennes (reasonable expectations of agents, etc.). Laloë avoue n'avoir pas compris l'avantage de cette approche. On se posera à son propos les deux questions suivantes : Information about what ? Whose information ?

Interprétation dBB (de Broglie et Bohm)

L'état d'un système associe, à chaque instant, sa fonction d'onde et la donnée de la position de chacune des particules qui le constituent. La fonction d'onde évolue selon l'équation de Schrödinger. Les positions des particules sont introduites par de Broglie et Bohm comme des variables supplémentaires. Leur trajectoires sont guidées par la fonction d'onde, par l'intermédiaire d'une seconde équation, complémentaire à l'équation de Schrödinger : l'équation pilote.

Soit par exemple un système de N particules sans spin.

Soit $X_1(t)$, $X_2(t)$, ... les positions de ces particules à l'instant t - Ψ la fonction d'onde, avec R son module et S sa phase. L'équation pilote donne le vecteur vitesse dX/dt de chaque particule du système, en fonction du *gradient de* S . On remarque l'intervention de la masse m des particules : plus ces dernières sont légères, plus elles se déplacent rapidement.

$$\Psi(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N) = R(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N) \exp[iS(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N)]$$

$$\frac{d}{dt} X_k(t) = \frac{\hbar}{m} \nabla_k S(t, x_1 = X_1(t), x_2 = X_2(t), \dots, x_k = X_k(t), \dots, x_N = X_N(t))$$

La théorie fait les mêmes prédictions que la mécanique quantique standard. Ses défenseurs considèrent qu'elle présente un avantage conceptuel, les concepts étant plus simples : les particules ont une position et l'onde est un champ sur l'espace des configurations (c-a-d l'espace des positions possibles de toutes les particules). Les positions sont considérées comme des grandeurs physiques ponctuelles, qui évoluent dans l'espace ordinaire à trois dimensions ; elles sont pilotées par une onde qui a également une réalité physique et qui se propage dans l'espace des configurations (d'où des effets non-locaux dans l'espace ordinaire). Onde et particule ne sont pas exclusives ou complémentaires (à la Bohr), mais forment un duo indissociable.

L'explication de l'expérience des interférences est simple. La fonction d'onde passe par les deux trous (de Young). Elle guide la particule, laquelle ne passe que par un seul trou. Mais la trajectoire ensuite n'est pas du tout rectiligne : elle tient compte des interférences entre les deux parties de la fonction d'onde. Sur un grand nombre de particules, on retrouve bien statistiquement les résultats expérimentaux des franges d'interférence. Il faut abandonner l'idée qu'une particule libre va en ligne droite. Les trajectoires bohmiennes, dans l'espace libre, ne sont pas nécessairement des trajectoires rectilignes.

Dans la théorie de Broglie-Bohm, la réduction du vecteur d'état est expliquée par le "mécanisme des ondes vides". Ce mécanisme rend compte du même coup de l'unicité macroscopique (arrêt de la chaîne de von Neumann). Appliquons en effet le modèle de von Neumann d'une mesure idéale, vue comme une interaction *ordinaire* entre le système mesuré et l'appareil de mesure ; après cette interaction, l'état intriqué du système global est la suivante :

$$\Psi(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N, r) = \sum_j \varphi_j(t, r) \Phi_j(t, x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N)$$

Dans cette équation, les indices j désignent les différentes issues possibles de la mesure, associées à des états - $\varphi_j(t, r)$ - de l'appareil de mesure, lesquels états sont macroscopiquement distinguables. Considérons maintenant l'espace de configuration du système mesuré (ici un système de N particules) ; les régions dans lesquelles les différentes fonctions d'onde "partielles" $\Phi_j(t, x_1, x_2, \dots)$ peuvent jouer un rôle actif de pilotage sont censées également ne pas se recouvrir. Au moins pour un appareil "bien construit". A l'issue de la mesure, la configuration des positions *effectives* des particules (X_1, X_2, \dots) se trouvera nécessairement, en conséquence, dans l'une de ces régions ; les autres régions seront *vides de particules*. Ces dernières seront donc pilotées par *une seule* des ondes $\Phi_j(t, x_1, x_2, \dots)$: seule cette onde continue à jouer un rôle dans la dynamique, toutes les autres en disparaissent totalement.

Ainsi la dynamique bohmienne contient-elle la réduction du vecteur d'état ; il n'est aucun besoin d'introduire deux postulats différents pour la dynamique quantique. Le processus de mesure devient un processus physique d'interaction tout-à-fait ordinaire.

Cette théorie est *strictement équivalente* à la mécanique quantique, ce qui la rend a priori non testable : elle change uniquement la représentation des phénomènes quantiques. Elle invalide, d'une certaine façon, les théorèmes sur l'interdiction de variables supplémentaires

Dynamique de Schrödinger modifiée (GRW, CSL, etc.)

Dans une autre classe de théories, le vecteur d'état représente directement la réalité physique, mais l'équation de Schrödinger est modifiée : à des instants réguliers ou aléatoires, le vecteur d'état subit des réductions qui tendent à localiser les particules dans l'espace ; pour réaliser ces "localisations spontanées", on suppose l'existence - en tout point de l'espace - de champs aléatoires, agissant sur le vecteur d'état (la fonction d'onde) pour effectuer la réduction

Il faut un certain compromis : des localisations trop fréquentes seraient incompatibles avec les résultats prédits par la mécanique quantique standard des systèmes microscopiques ; des localisations trop peu fréquentes ne permettraient pas d'éviter les superpositions cohérentes macroscopiques du type chat de Schrödinger.

Il existe deux classes de telles théories : des théories à localisation spontanée discontinue (GRW, Ghirardi Rimini et Weber) et des théories à localisation spontanée continue (CSL, P. Pearle). Ces théories ne sont pas équivalentes à la mécanique quantique standard, mais il est possible d'assurer le bon compromis, c'est-à-dire d'ajuster leurs paramètres, de façon à les rendre compatibles avec toutes les observations expérimentales déjà expliquées. Elles peuvent cependant être testées, car elles permettent de faire des *prédictions nouvelles*, par exemple de prédire la perte des interférences dans les expériences à deux fentes faites avec de grosses macromolécules.

Everett (mondes multiples)

Franck Laloë termine son exposé des interprétations par celle dite "des mondes multiples". Hugh Everett, physicien américain mort en 1982, énonce, pour dire la chose rapidement, que la chaîne de von Neumann n'a pas de limite : l'appareil de mesure et l'observateur sont parties prenantes de la ramification du vecteur d'état à chaque mesure. Concernant cette théorie, notre conférencier souligne les points suivants :

1. C'est une théorie "réaliste" et déterministe : il est légitime de parler de "vecteur d'état de l'Univers", indépendamment de tout rôle des observateurs. Ce vecteur d'état évolue uniquement sous l'effet de l'équation de Schrödinger.
2. Les observateurs perçoivent cependant un indéterminisme, car la composante de leur « registre mémoire », sur chaque branche du vecteur d'état, n'a aucun moyen de se rendre compte de l'existence des autres branches.
3. Cette interprétation rappelle la théorie de Broglie-Bohm, où toutes les branches du vecteur d'état continuent elles aussi à se propager. Dans la théorie *dBB*, ce sont les positions bohmienne des particules du système qui rendent certaines branches « vides » ; ici ce sont les registres mémoires qui produisent le même effet, en restreignant spontanément leur enregistrement et leur lecture à une seule branche.

4. Comme les différentes branches sont indépendantes, on peut associer à chacune un «monde», d'où la version de la théorie appelée « MWI » (many-world-interpretation). une version qui a les faveurs de certains cosmologistes quantiques

Il est à noter que cette interprétation est considérée assez favorablement par certains cosmologistes quantiques.

interprétations diverses, citées mais non développées.

D'autres interprétations ont vu le jour, que Franck Laloe ne développe pas : **consistent histories** (Griffiths, Omnès, Hartle, Hohenberg) : c'est le même schéma général que Bohr, mais il est plus précis ; **relationnelle** (Rovelli) ; **modale** (van Fraassen, Healey) ; **transactionnelle** (Cramer) ; **Réel voilé** (d'Espagnat) ; **logiques** quantique, algébrique, formelle, constructive, etc. (von Neumann, Hilbert, Jauch, Kastler, etc.) ; théorème de Gleason ; **opérateurs densité emboîtés** (Balian et al.) ; **contextuelle** (Grangier et al.)...

En Conclusion : la fin des interdits ?

La mécanique quantique est une théorie qui marche fantastiquement bien. Elle est avec la relativité l'un des plus grand succès de l'esprit humain. Un exemple frappant de son extraordinaire puissance prédictive : la condensation de Bose-Einstein dans les gaz, prédite en 1925 et observée en 1995. C'est un état de la matière qui ne pouvait pas exister spontanément, car il exige une température très basse (le degré microKelvin), alors que la température naturelle la plus basse est en effet de 2,7 degré Kelvin. La nature n'avait donc jamais réalisé un condensat de Bose Einstein.

Mais bien des « interdits » énoncés par les « pères fondateurs de la théorie quantique » ont été bousculés : on peut observer en temps réel des atomes, des électrons, et même des photons, uniques (isolés), voire des sauts quantiques, etc.

On sait construire des théories plus simples conceptuellement que la mécanique quantique, lesquelles sont également en accord avec l'ensemble des données expérimentales actuelles. La théorie quantique peut être comprise sous une forme différente de celle que nous avons apprise ; elle n'est peut-être pas immuable. L'avenir le dira.

La discussion

A la fin de l'exposé, une très riche discussion a eu lieu.

Claude ELBAZ : Quand vous parlez de l'équation de Schrödinger, c'est de l'équation de Schrödinger non relativiste. Dans ce cas, vos objets quantiques restent identiques à eux-mêmes et ne se transforment pas.

Franck LALOE : On peut bien sûr se placer dans le cadre de la théorie quantique des champs relativistes. Mais on a toujours des champs qui se propagent et une réalité qui se

transforme. Les problèmes se posent dans les mêmes termes. Il y a un temps où les gens pensaient que le théorème de Bell ne s'appliquait pas, lorsque la physique était relativiste, mais c'était une erreur. Je ne pense pas que l'aspect relativiste soit essentiel dans les problèmes d'interprétation.

Alain STAHL: Il semble qu'il n'y ait pas actuellement d'interprétations qui permettent de se comparer avec l'interprétation standard : l'interprétation *dB* donnent les mêmes résultats ; l'interprétation GRW donnent des résultats différents, mais cette différence est actuellement trop infime.

Franck LALOE : L'interprétation *dB* est construite pour être équivalente ; pour GRW, il reste actuellement une grande fourchette pour ses deux paramètres, fourchette qui diminue avec les expériences.

Jean-Pierre TREUIL : Ces changements dans l'équation de Schrödinger, sont-ils ad'hoc ou ont-ils un sens physique ?

Franck LALOE : Pour les développeurs, cela produit une très grande simplification conceptuelle. La fonction d'onde existe et c'est elle qui représente la réalité directement. C'est une dynamique unifiée. Bien sûr, on peut refuser de toucher à l'équation de Schrödinger, mais alors on revient à toutes les difficultés conceptuelles dont j'ai parlé. Pour le moment, c'est esthétique et cela a le mérite d'exister. Quand on m'a enseigné la mécanique quantique, on m'a dit : il n'y a pas d'interprétation plus simple (que celle de Copenhague) ; c'est un mystère fondamental de la nature. On ne peut pas en dire plus. Si les théories dont on vient de parler sont vraies, on peut dire beaucoup plus sur la nature.

Prenons l'exemple de la relativité. Les gens disent en général: Einstein a montré que l'on ne peut pas utiliser le temps absolu. Ce n'est pas vrai ; on pourrait utiliser le temps absolu; ce serait par exemple le temps dans le référentiel cosmologique, mais ce serait très mal commode car il faudrait sans cesse faire des transpositions entre le temps absolu et le temps mesuré par les horloges. On pourrait, et c'est le point de vue de Poincaré, faire la relativité restreinte avec un temps absolu. On peut procéder de façon similaire avec la mécanique quantique.

Michel GONDRAN: C'est le théorème de von Neumann qui a permis d'éliminer les théories à variables cachées et a aidé à imposer l'interprétation de Copenhague. Tout le monde y a cru, même de Broglie qui l'a même enseigné.

Franck LALOE : exact. Comme vous le savez, de Broglie n'était pas un défenseur forcené de l'onde pilote, ce qu'il aimait surtout était sa théorie de la double solution qu'il n'a jamais réussi à mettre au point. Lorsqu'il a présenté la solution de l'onde pilote en 1927, c'était parce qu'il n'était pas au point sur la théorie de la double solution. Lui-même n'y croyait qu'à moitié. Cela montre que l'avancement des physiciens n'est pas linéaire, qu'ils peuvent se tromper.

Jean-Pierre BESSIS: Les différentes théories dont vous avez parlées vont avoir plus ou moins d'adeptes. Est ce que, dans la perspective des travaux de Kuhn, on peut parler d'une sociologie de cette répartition. Y-a-t-il des phénomènes de mode?

Franck LALOE : C'est clair, il existe des phénomènes de mode en physique. C'est clair aussi que ceux qui proposent une interprétation sont des partisans de cette interprétation. Quoi que Bohm lui-même n'était pas un fana de son interprétation. Je ne sais pas s'il y a eu des études sociologiques sur un échantillon aussi restreint que celui des spécialistes de la mécanique

quantique. Par contre, lorsque j'interroge depuis vingt ans mes collègues sur la mécanique quantique, ils ont tous des positions très tranchées et auto-contradictoires.

Claude ELBAZ: Y-a-t-il une théorie qui l'emporte sur les autres?

Franck LALOE : Pour le moment, non. Ce que j'ai essayé de faire dans ce bouquin, c'est un exposé un peu neutre pour présenter la situation actuelle. Rien ne l'emporte de façon flagrante.

Claude ELBAZ : Einstein était le plus grand spécialiste des problèmes statistiques en mécanique quantique. Comment interprétez vous son attitude, d'avoir toujours refusé l'approche probabiliste?

Franck LALOE : Einstein était en effet très fort en mécanique statistique. Sur les statistiques pour lesquelles on fait des moyennes, il n'avait aucun problème. Pour compléter la fonction d'onde, avait-il en tête des variables cachées? Son grand espoir était placé dans la gravitation, espoir de voir les non linéarités de la relativité générale se combiner avec la mécanique quantique, pour faire quelque chose qui ressemblerait peut-être à GRW. Je pense qu'il avait en tête une équation de Schrödinger modifiée.

Victor MASTRANGELO : Gilles Cohen-Tannoudji pourrait nous répondre. Il s'intéresse beaucoup à ces questions, mais il est absent aujourd'hui.

Michel GONDRAN : J'ai remarqué que dans tous les livres de mécanique classique, les conditions initiales des équations d'Hamilton-Jacobi ne sont jamais présentées. Or, c'est grâce à sa condition initiale que l'on peut montrer que l'action d'Hamilton-Jacobi est un champ qui pilote la particule classique comme la phase de la fonction d'onde pilote la particule quantique dans l'interprétation *dBB*. La non connaissance de ce résultat de mécanique classique est peut-être aussi dommageable pour l'acceptation de l'interprétation *dBB* que l'a été le théorème de von Neumann. De plus, on peut montrer qu'il existe en mécanique classique l'équivalent de l'intégrale des chemins de Feynman en mécanique quantique. C'est ce que j'ai appelé l'intégrale de chemins minplus, qui est une équation qui relie l'action d'Hamilton-Jacobi aux différentes actions d'Euler-Lagrange ; elle est analogue au calcul de la fonction d'onde à partir des différentes actions d'Euler-Lagrange.

Franck LALOE : Etant en train d'écrire un chapitre sur les intégrales de Feynman, je suis intéressé par des informations plus précises sur cette approche.

Victor MASTRANGELO : Vous avez parlé de Carlo Rovelli. Quelles sont ses contributions dans le domaine?

Franck LALOE : C'est un théoricien de la gravitation. En particulier de la gravitation à boucles. En mécanique quantique, il présente une interprétation qu'il appelle relationnelle. C'est une interprétation assez abstraite, où chaque objet quantique qui s'intrique avec un autre mesure son partenaire.