

Collège de Physique et de Philosophie  
CONFÉRENCE DU 22 NOVEMBRE 2010  
Edouard Brézin

**Bernard d’Espagnat** : Je suis très heureux de pouvoir vous accueillir ici, dans ce nouveau groupe de travail intitulé : « apports de la physique contemporaine à la théorie de la connaissance » auquel vous avez gentiment accepté de participer. À vrai dire, ces apports sont essentiellement des mises en questions. Des mises en question d’idées reçues et aussi d’idées qui sont très fortement ancrées en nous, si bien que leur remplacement est difficile. Nous allons donc avoir beaucoup à réfléchir et à discuter. Et, nous ne serons pas toujours d’accord, cela est sûr. Mais le sujet est passionnant et, à mon avis, à long terme très important. Et je suis convaincu qu’en discutant, en nous retrouvant assez régulièrement, en échangeant nos idées sur ces questions, chacun d’entre nous arrivera à se faire une idée plus précise des contraintes que la physique contemporaine impose à notre vision du réel et, par conséquent, de ce en quoi les apports en question peuvent consister.

En ce qui concerne le groupe proprement dit, il est piloté conjointement par l’Académie des sciences morales et politiques qui nous reçoit ici, et par une petite association nouvellement créée qui porte le nom de « Collège de physique et de philosophie » et dont le président, M.Hervé Zwirn, ici présent, va nous donner un rapide aperçu dans quelques instants.

Avant cela, comme nous allons travailler ensemble et comme nous ne nous connaissons pas tous, je pense qu’il est indispensable de faire un rapide tour de table pour que chacun dise qui il est. Mais comme nous sommes assez nombreux, je vous propose que ce soit le service minimum, c’est-à-dire que chacun de nous dise essentiellement son nom, le domaine dans lequel il travaille, et également son organisme de rattachement, s’il y en a un. Je vous donne l’exemple, si vous voulez :

**Bernard d’Espagnat** : physicien théoricien, Professeur émérite à l’université de Paris 11 Orsay.

**Olivier Rey** : chercheur au CNRS, j’ai été longtemps mathématicien au Centre de Mathématiques Laurent Schwartz de l’Ecole Polytechnique et j’appartiens maintenant au CREA. J’ai eu Monsieur Brézin comme Professeur de Physique.

**Hervé Zwirn** : je suis physicien et je suis rattaché au Centre de mathématiques appliquées de l’ENS de Cachan et Professeur associé à Paris 7

**Jean Petitot** : je suis à la fois au Centre de mathématiques, CAMS, de l’EHESS et au CREA à l’Ecole Polytechnique et je m’intéresse d’une part aux modèles en sciences cognitives et d’autre part à la philosophie des mathématiques et de la physique.

**Stéphanie Ruphy** : je suis à l’université de Provence au Département de philosophie et je fais principalement de la philosophie générale des sciences.

**Julien Boyer** : doctorant à l’IHPST, philosophie de la logique et des mathématiques.

**Léna Soler** : membre des archives Henri Poincaré à Nancy, je travaille en philosophie des sciences et de la physique

**Olivier Darrigol** : je suis chercheur en histoire de la physique, membre de l'équipe de recherche Rehseis, rattaché à l'UMR SPHERE.

**Jean-Paul Baquiast** : je ne suis pas physicien, mais j'anime depuis dix ans une revue sur le net qui s'appelle « L'automate intelligent » et cela m'a donné l'occasion d'avoir d'innombrables contacts dans les différentes disciplines scientifiques, notamment à propos des relations entre la physique, la biologie, la cognition, et l'intelligence artificielle.

**Matteo Smerlak** : doctorant en physique théorique à Marseille, au Centre de physique théorique.

**Alexis de Saint Ours** : doctorant à l'université Paris 7. Je travaille en philosophie de la physique et mon travail porte en particulier sur la question du temps.

**Jean-Michel Raimond** : laboratoire Kastler Brossel, ENS, université Pierre et Marie Curie. J'ai peur d'être ici le seul expérimentateur. Je suis un expérimentateur de physique quantique fondamentale. Je cultive en particulier des chats de Schrödinger et autres bestioles très quantiques.

**Edouard Brézin** : laboratoire de Physique théorique de l'ENS, Professeur émérite ENS à Paris 6.

**Bertrand Saint Sernin** : j'ai été Professeur à l'université Paris 4 où j'ai enseigné la philosophie des sciences. J'ai été auparavant recteur et ma thèse portait sur les mathématiques de la décision. Donc la physique est un domaine que je connais mal et je suis d'autant plus content de pouvoir m'instruire auprès de vous.

\*\*\*

**BdE** : Merci à tous. La parole est maintenant à Hervé Zwirn qui va nous dire quelques mots sur cette petite association que j'ai nommée il y a quelques minutes.

**HZ** : Comme vous le savez sans doute Bernard d'Espagnat a reçu le prix Templeton l'année dernière. Et il a souhaité consacrer une partie de ce prix à la création, au financement et au fonctionnement d'une association dont l'objet est de favoriser la réflexion autour des apports de la physique en général, et plus particulièrement de la physique quantique, à la théorie de la connaissance. C'est ainsi qu'il a demandé à Jean Petitot, ici présent, Michel Bitbol qui n'a pas pu être présent aujourd'hui et moi-même de créer avec lui cette association, qui porte le nom de *Collège de physique et de philosophie*. L'objet de ce Collège est de favoriser la réflexion autour de ces thèmes et nous allons mener un certain nombre d'actions en ce sens. D'abord une série de séances qui se tiendront ici à l'Académie des sciences morales et politiques, que le Collège remercie au passage de nous accueillir, avec des discussions entre philosophes et physiciens. Mais aussi une série de séances plus dirigées vers le grand public, que nous organiserons de manière à diffuser les idées autour de ces thèmes. Il y aura sans doute d'autres actions que nous allons mener progressivement. Mais le Collège est tout jeune, il vient d'être créé. Et c'est progressivement que ces actions seront mises en place. Je suis donc ravi que la première séance du Collège se tienne aujourd'hui et que nous puissions comme cela démarrer nos travaux.

**BdE** : Merci beaucoup. Nous pouvons maintenant attaquer le vif du sujet et écouter Edouard Brézin. On ne présente pas Edouard Brézin, en particulier ici, à l'Institut, puisqu'il a présidé pendant deux ans l'Académie des sciences. Je voudrais néanmoins rappeler, juste en deux mots, que ses recherches théoriques ont très considérablement éclairé le comportement de la matière condensée au voisinage des points critiques. Toutefois, rassurez-vous, M. Brézin n'a nullement l'intention de nous faire un cours là-dessus ce soir. Ce sont là des questions extrêmement de pointe, je ne pense pas que nous arrivions jamais à ce haut niveau de précision théorique, et en tout cas ce ne sera pas lors de la première séance ! M. Brézin en est tout le premier conscient et il a, au contraire, gentiment accepté de nous faire un exposé introductif. Introductif essentiellement aux questions que nous allons avoir à débattre ensemble, c'est-à-dire aux questions, éminemment conceptuelles, des relations entre la physique et la philosophie, autrement dit touchant à la conception qu'on peut se faire de la réalité et de ce qu'on entend par là. C'est ce dont témoigne le titre de l'exposé : « l'étrangeté incontournable du monde quantique ».

\*\*\*

## CONFÉRENCE D' EDOUARD BREZIN.

### L'ÉTRANGETÉ INCONTOURNABLE DU MONDE QUANTIQUE.

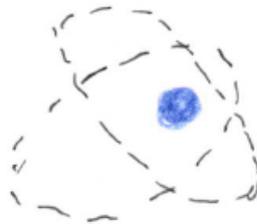
Je voudrais d'abord remercier beaucoup Bernard d'Espagnat. Il se trouve que j'ai suivi ses cours de mécanique quantique autrefois au DEA de physique théorique à Orsay et donc c'est un peu embarrassant pour moi de parler de mécanique quantique devant vous. À double titre d'ailleurs, car, comme tous les physiciens d'aujourd'hui, je ne suis qu'un praticien de la physique quantique, et praticien qui ne l'a jamais vue en défaut. Mais je n'ai pas de réflexion particulière sur la mécanique quantique. Je me suis contenté de l'enseigner à mon tour, avant de passer le bâton à Jean-Michel Raimond. Ce que j'ai à dire sur la mécanique quantique, ne relève que de la pratique ordinaire : je vais essayer d'évoquer devant vous sa complexité, pas au plan technique, mais sur celui des questions intellectuelles qu'elle soulève. Faut-il rappeler la célèbre citation de Feynman à ce sujet ? Feynman, grand héros de la mécanique quantique, puisque la formulation qu'il a introduite en termes d'intégrales de chemin, sans remettre en cause les idées de l'Ecole de Copenhague, a néanmoins modifié complètement dans la période contemporaine notre vision de cette mécanique. Richard Feynman dans la première page de son cours de mécanique quantique, le volume 3 de ses fameuses leçons, écrit

*“ Because atomic behavior is so unlike ordinary experience, it is very difficult to get used to it, and it appears peculiar and mysterious to everyone –both to the novice and to the experienced physicist. Even the experts do not understand it the way they would like to, and it is perfectly reasonable that they should not, because all of direct, human experience and of human intuition applies to large objects “*

La mécanique quantique nous a donc fait pénétrer dans un monde étrange, mais qui est bien le nôtre. Je ne vais pas du tout m'étendre sur l'histoire de la mécanique quantique. Il faudrait pour cela de longs exposés et il y a des personnes mieux placées que moi pour le faire. Je voudrais rappeler que du dernier quart du 19<sup>ème</sup> siècle jusqu' en 1926 l'impuissance de la physique classique à décrire de nombreux phénomènes se manifeste de partout. Mentionnons par exemple l'étude des raies spectrales d'émission et d'absorption des atomes, une sorte de musique des atomes comme il y a une musique des cordes vibrantes. Il y a une

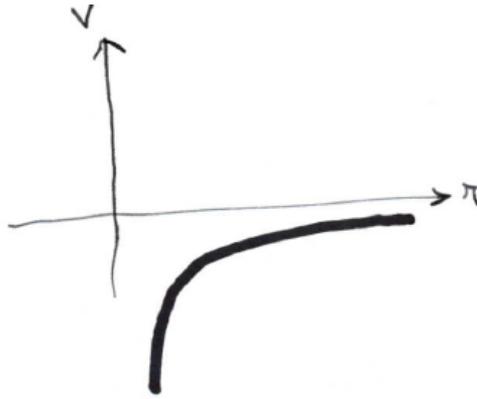
accumulation, une numérogie absolument extraordinaire pour classer ces raies. Ce sera, comme vous le savez sans doute, l'un des triomphes de Niels Bohr que d'expliquer entièrement cette numérogie en ce qui concerne l'atome d'hydrogène, à la suite de quoi il recevra le Prix Nobel en 1922. La naissance "officielle" de la mécanique quantique se place en 1900 avec l'article de Max Planck sur le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire le rayonnement d'un corps chauffé, qui en physique classique est totalement incompréhensible à de nombreux égards. Le raisonnement classique conduit en effet à un rayonnement qui ne cesse d'augmenter avec la fréquence, une divergence évidemment inadmissible. De plus les expériences de Lummer et Pringsheim (1894) montrent bien qu'il y a une complète contradiction entre les idées classiques et ce qu'on observe. Planck tente de s'en sortir par une hypothèse difficilement compréhensible de "niveaux d'énergie quantifiés" et de "quanta de rayonnement" qu'il mettra beaucoup de temps à essayer de justifier et qui ne le sera pleinement que bien des années plus tard par Bose et Einstein.

Mais il me semble que la crise la plus grave suit la découverte du noyau atomique par Rutherford en 1909. L'atome devient franchement incompréhensible et son existence s'oppose violemment à la physique classique. En 1909 Rutherford découvre qu'au centre de l'atome il y a un noyau dur, qui en prend quasiment toute la masse. Il détermine la taille de ce noyau qui est environ  $10^{-15}$  mètres. C'est donc un noyau extrêmement petit si l'on se souvient que la taille des orbites électroniques est environ 100 000 fois plus grande.



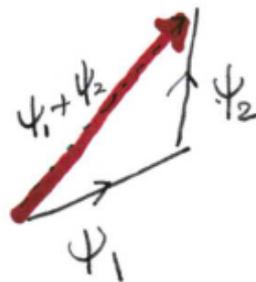
Imaginons ce que veut dire 100 000 fois plus grande. Si on imaginait que le noyau occupait toute la pièce où nous sommes qui a 10 mètres de long, les électrons seraient à 100000 fois 10 mètres c'est-à-dire 1000 kilomètres. Entre cette pièce et les 1000 km où se trouvent les électrons en orbite, il n'y a rien. C'est-à-dire que notre matière est vide. Pourquoi est-elle vide ? (Remarque : elle est vide dans la matière usuelle, mais l'astrophysique nous met en présence d'objets fort différents. C'est ainsi qu'il existe des étoiles qui n'ont que quelques kilomètres de diamètre et une masse aussi grande que celle du soleil – les étoiles à neutrons). En revanche, la matière qui nous entoure est quasi-vide. Pourquoi en est-il ainsi ?

En d'autres termes pourquoi les électrons ne perdent-ils pas de l'énergie potentielle en se rapprochant du noyau ? Normalement, en physique classique, une particule chargée qui tourne autour d'un centre, est donc douée d'une accélération non nulle, puisque seul le mouvement rectiligne linéaire n'est pas accéléré. Or toute particule chargée accélérée émet du rayonnement, et perd ainsi de l'énergie. C'est bien ce qui se passe dans les accélérateurs destinés à produire du rayonnement synchrotron : celui-ci est produit par des électrons maintenus dans des trajectoires circulaires contenues dans un anneau.



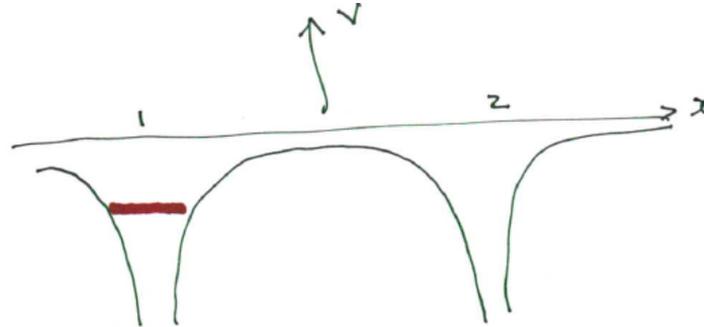
Pourquoi dans les atomes les électrons ne rayonnent-ils pas en perdant de l'énergie et en tombant sur le noyau ? Cela était absolument incompréhensible et le raisonnement de Bohr qui permet de calculer la taille des orbites électroniques et postule cette absence de rayonnement ne fournit pas vraiment d'explication qualitative. Il faudra attendre Heisenberg et Schrödinger pour le comprendre.

Avant d'essayer d'en donner une vision intuitive, je vais rentrer un peu plus dans la description de la physique quantique. Il faut commencer avec la notion d'état. Les états, il faut se les représenter comme des vecteurs, sauf que ce ne sont pas des vecteurs dans l'espace ordinaire. Ce sont des vecteurs dans un espace abstrait. Les vecteurs dont il s'agit ici, ce sont des objets que l'on peut ajouter entre eux et que l'on peut multiplier par un nombre complexe. Soient un vecteur  $|\psi_1\rangle$  et un vecteur  $|\psi_2\rangle$  ; on obtient un autre vecteur en faisant la somme des vecteurs  $|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$ , ou plus généralement  $\lambda_1|\psi_1\rangle + \lambda_2|\psi_2\rangle$ , où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont des nombres complexes. La physique quantique se formule de cette façon, il y a une structure linéaire dans un espace des états, qui n'est pas l'espace à trois dimensions, mais est un espace abstrait. Dans ces conditions, on peut *superposer* des états et considérer l'état  $|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle$  ou l'état  $|\psi_1\rangle - |\psi_2\rangle$ , de la même façon qu'on peut parler de la somme ou de la différence de deux vecteurs.



Il faut bien se rendre compte que cette hypothèse implique immédiatement une représentation extrêmement différente de notre vision classique. Pour l'illustrer je vais décrire sommairement comment se présente en physique quantique la liaison chimique. Imaginez que l'on ait deux noyaux chargés positivement et un électron. Si ces deux noyaux sont très éloignés il est possible d'avoir un état gauche dans lequel l'électron serait lié au noyau numéro 1, et aussi un état droit dans lequel l'électron suivrait le noyau droit. Mais si les deux noyaux se rapprochent, il existe en mécanique quantique un phénomène classiquement interdit qui est le franchissement des barrières de potentiel, que l'on appelle *l'effet tunnel*. Représentons-nous l'énergie potentielle que « voit » l'électron : au voisinage du noyau 1, il voit un puits de potentiel attractif, de même au voisinage du noyau 2 ; entre ces deux puits

une barrière. Classiquement, si l'électron était situé au voisinage du noyau 1, cette barrière de potentiel lui interdirait de s'approcher du noyau 2. Mais, du fait que la mécanique quantique, à cause de son caractère ondulatoire — sur lequel évidemment je vais revenir — permet à l'onde de sortir de l'espace où les particules classiques sont confinées, on parle en optique d'onde évanescente, l'électron peut transiter d'un noyau à l'autre.



Un calcul élémentaire montre alors que la possibilité de franchissement de la barrière implique que c'est l'état  $|gauche\rangle + |droite\rangle$  qui a l'énergie la plus basse. C'est-à-dire que les deux noyaux sont liés par cet électron : l'énergie est plus basse en ayant un électron dans l'état  $|gauche\rangle + |droite\rangle$ , que s'il accompagnait seulement un des deux noyaux. C'est là l'origine de la liaison puisqu'il faudrait fournir de l'énergie pour revenir à la situation dans laquelle l'électron n'accompagnerait qu'un seul noyau.

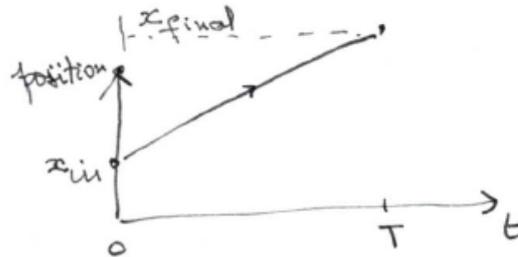
Les deux noyaux sont liés par l'électron et ils sont liés par cette impossibilité, dans un état  $|gauche\rangle + |droite\rangle$ , de dire si l'électron est à gauche ou s'il est à droite. Il est complètement délocalisé, et c'est cela qui est à l'origine de la liaison électronique. C'est elle qui est à l'œuvre dans les molécules dans lesquelles plusieurs noyaux vont se lier. Ce n'est pas donc pas un phénomène ésotérique puisqu'il est à l'œuvre dans toute la chimie des atomes et des molécules. (La liaison *covalente* ne fait que reprendre ce même phénomène pour deux électrons au lieu d'un, mais leurs *spins* sont opposés).



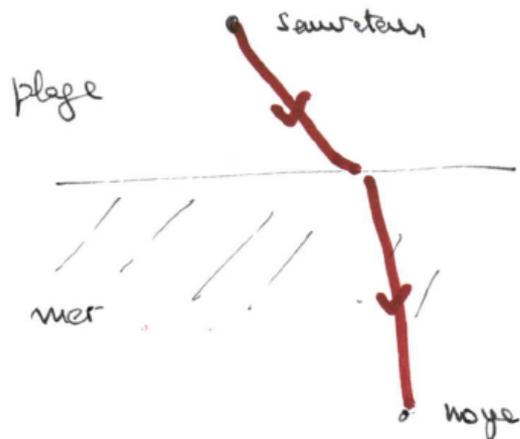
L'évolution des états est tout aussi déterministe en mécanique quantique qu'en mécanique classique, c'est-à-dire que si on connaît les forces en présence, l'état à l'instant  $t$  se déduit de l'état à l'instant  $0$  par un algorithme parfaitement défini. L'algorithme s'appelle l'équation de Schrödinger dans le cas non relativiste et il devient l'équation de Dirac lorsque les vitesses se rapprochent de celle de la lumière. Lorsqu'il y a des phénomènes de création et d'annihilation de particules, il faut entrer dans ce qu'on appelle la théorie des champs. Mais l'évolution y reste parfaitement définie.

Je vais introduire immédiatement le point de vue de Feynman qui est essentiel pour comprendre la différence classique-quantique. L'évolution est caractérisée par Feynman par une somme sur des *histoires*. En mécanique classique, si l'on sait qu'à l'instant  $0$ , une particule est située à la position initiale  $x_{in}$  et qu'au temps  $T$ , elle va aller au point final  $x_f$ ,

alors sa trajectoire est définie : elle est définie par un principe que l'on appelle le principe de moindre action, selon les cas le principe de Fermat ou de Maupertuis, qui permet de déterminer la trajectoire classique qui va du point initial au point final. C'est là la vision de la mécanique classique.



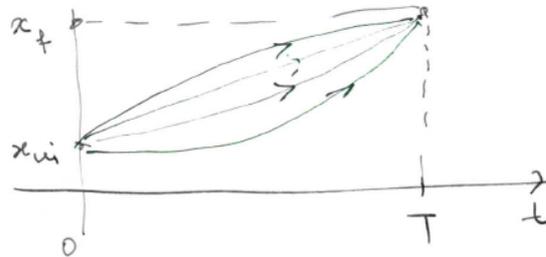
Cette minimisation de l'action est à l'œuvre par exemple dans les lois de Descartes-Snell sur la réfraction. Pour se représenter cela de manière imagée on peut imaginer un sauveteur sur une plage qui voit quelqu'un en train de se noyer. Que va faire le sauveteur pour aller au secours du noyé ? Il va prendre la trajectoire dans laquelle il met le moins de temps possible pour aller au malheureux. Or il court bien sûr plus vite qu'il ne nage : la ligne droite du sauveteur au noyé n'est pas donc celle qui minimise la durée ; en effet il va avoir intérêt à aller un peu plus sur la plage que dans la ligne droite (vers le noyé) où il aurait beaucoup plus de natation à faire. Le résultat pour la lumière est la loi de Descartes-Snell sur la réfraction.



En réalité, cette présentation de la physique classique montre que celle-ci est assez étrange. En effet le sauveteur a choisi sa trajectoire car il sait parfaitement où se trouve le noyé. C'est dans ces conditions qu'il détermine la trajectoire qui lui prendra le moins de temps. Mais la lumière qui va aller de l'air à l'eau, par exemple, ne sait absolument pas où se trouve le "noyé". D'une certaine façon, on peut dire que bizarrement, la physique classique n'est pas vraiment causale : comment la lumière peut-elle déterminer sa trajectoire sans savoir où elle doit aller ? Il se trouve que là le point de vue quantique explique, éclaire, ce paradoxe. Nous sommes là dans un cadre où c'est la physique classique qui est paradoxale et la physique quantique résout ce paradoxe (on lira à ce sujet l'exceptionnel opuscule de Feynman intitulé *QED*, c'est-à-dire Quantum Electrodynamics ; il n'est pas technique, il ne comporte aucune équation).

En effet, dans la vision de Feynman, il ne faut pas s'imaginer qu'il n'y a qu'une seule trajectoire, celle qui minimise l'action. En physique quantique toutes les trajectoires sont

possibles : n'importe lequel *chemin* qui va de  $x_{in}$  à  $x_f$ , dans le temps  $T$ , est réalisé. Et pour trouver l'amplitude de probabilité (je vais revenir à ce qu'on appelle amplitude de probabilité), l'amplitude qui permet de caractériser quantiquement le passage d'un point initial à un point final pendant le temps  $T$ , il faut sommer sur toutes ces histoires.



À chaque histoire, on associe un nombre complexe (excusez-moi d'entrer dans les formules). Ce nombre complexe c'est l'exponentielle de l'action divisée par une constante qui est la constante de Planck. Et pour trouver le résultat quantique, il faut imaginer que la particule qui va du point initial au point final utilise toutes les trajectoires, et que, pour chacune, on somme ce facteur, ce nombre complexe, appelé « amplitude »

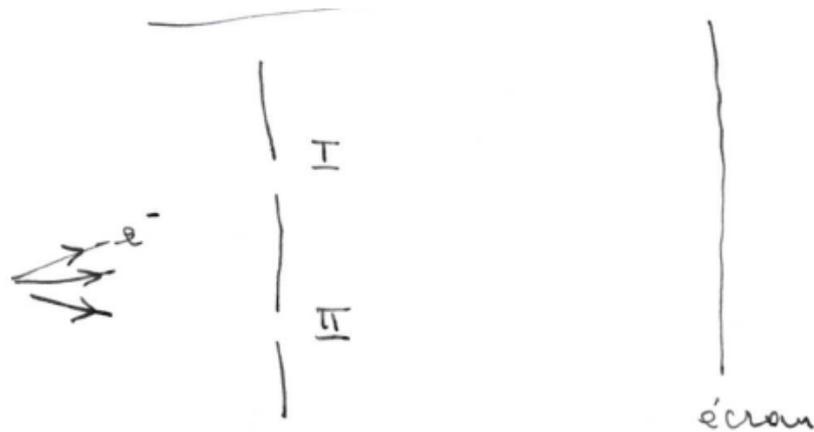
$$e^{iS/\hbar}$$

Au total on a la somme

$$\sum_{\text{toutes les trajectoires}} e^{iS/\hbar}$$

Dans toutes les situations macroscopiques, cette somme est dominée par la trajectoire classique. Permettez-moi d'expliquer un tout petit peu intuitivement les choses : si j'envoie un caillou dans l'eau, ce caillou va fabriquer une onde, qui va se propager. Si j'envoie deux cailloux dans l'eau, alors c'est déjà un peu plus compliqué. On voit qu'il y a des points où il y aura des crêtes parce que les deux ondes qui arrivent sont en coïncidence et il y a des endroits où les deux ondes sont opposées, l'une est dans une crête alors que l'autre est dans un creux, et il va y avoir un plat. Cela donne des interférences, très faciles à visualiser avec deux cailloux. Mais imaginez que vous envoyiez des milliards ou plutôt des milliards de milliards de cailloux sur l'eau sans arrêt. Cela va produire un clapotis tellement distribué qu'en définitive presque partout rien ne va bouger. C'est bien cela qui se passe dans cette somme de Feynman. Lorsque nous sommes dans une situation où les effets quantiques sont négligeables, les interférences produites en ajoutant ces diverses trajectoires se compensent presque partout. Il ne va rester que la trajectoire qui "domine" cette somme, qui est la trajectoire classique. Donc, cette vision non causale de la mécanique classique, cette vision dans laquelle on sait par avance où il faut aller si l'on utilise le principe de moindre action, n'est qu'une apparence qui résulte des interférences entre chemins non classiques. La causalité est bien plus présente en mécanique quantique qu'en mécanique classique.

Je reviens maintenant à l'expérience bien connue des trous de Young dans le monde quantique. L'expérience consiste, comme vous le savez, à considérer le dispositif suivant : on interpose entre une source émettant un faisceau lumineux cohérent et un écran, un premier écran percé de deux trous.

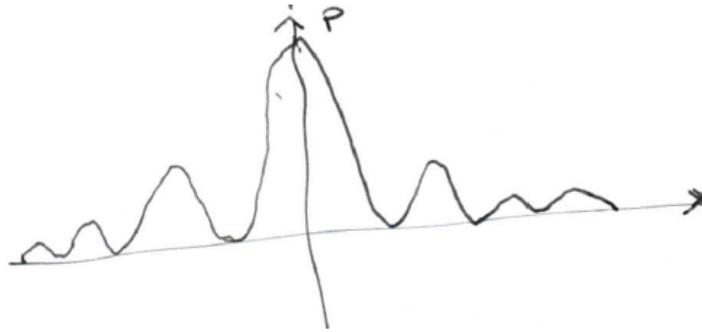


Young en 1801 opérait avec une source lumineuse et, observant les interférences produites sur l'écran final, il avait conclu au caractère ondulatoire de la lumière. Mais elle a été répétée depuis avec bien d'autres faisceaux de particules. Davisson et Germer ont découvert en 1927 que les électrons pouvaient, comme la lumière, se diffracter, confirmant ainsi la prédiction théorique de Louis de Broglie en 1924 (qu'ils ne connaissaient pas !) du caractère dual onde et particule associé à toute particule. Aujourd'hui, les microscopes électroniques utilisent de manière routinière cette propriété des électrons d'être aussi bien des ondes que des particules.

Donc, revenons à l'expérience des trous d'Young quantiques : si nous obturons d'abord l'orifice numéro 2 de l'écran interposé, nous trouvons une tache sur l'écran final, centrée autour de l'image géométrique du trou numéro 1. Si c'est l'orifice 1 qui est bouché, on a une tache autour de l'image de 2. Ce sont là les deux trajectoires classiques possibles.



Mais, comme vous le savez, si on ne bouche aucun des deux orifices, la somme de Feynman sur ces deux histoires produit un éclaircissement qui n'est pas la somme des éclaircissements antérieurs (*il faut prendre garde ici : la somme de Feynman est une somme d'amplitudes de probabilité ; les probabilités, c'est-à-dire les éclaircissements, sont les modules au carré des amplitudes : la carré d'une somme n'est pas la somme des carrés*). La loi d'éclaircissement résultant ne s'explique que parce que l'électron passe par les deux trous.



Cette expérience d'interférence a été longuement commentée, en particulier par Feynman. Elle est aujourd'hui réalisée de manière routinière. On peut aujourd'hui envoyer des électrons un par un et on observe des impacts successifs dispersés aléatoirement sur l'écran final. Lorsque l'on accumule les résultats, on retrouve un éclaircissement avec des zones d'impacts denses et d'autres sans aucun impact, une image qui n'est autre que celle des franges d'interférence de l'expérience d'Young. Feynman a longuement analysé cette expérience. En particulier, il imaginait que l'on mette une lampe derrière l'écran percé entre les trous 1 et 2, pour savoir, puisque l'électron interagit avec la lumière, si l'électron était passé par le trou numéro 1 ou par le trou numéro 2. Or dès que l'on a déterminé par quel trou l'électron est passé les franges d'interférence disparaissent. On se retrouve dans la même situation que celle où l'on enverrait des billes classiques (c'est-à-dire dans des conditions où le caractère ondulatoire ne se manifeste pas du fait de la petitesse de la longueur d'onde de de Broglie associée). Feynman argumente alors et se demande si cette disparition des interférences est provoquée par le rayonnement de la lampe destinée à savoir par quel trou passe l'électron qui *perturbe* par cette interaction l'onde électronique. Il imagine alors que l'on tente de minimiser cette perturbation ; pour cela il faut éclairer les trous avec un rayonnement de longueur d'onde la plus grande possible : ainsi les photons correspondants, qui ont une impulsion qui est l'inverse de leur longueur d'onde, sont extrêmement « gentils » avec les électrons et ne les perturbent pas trop. Mais hélas , à partir du moment où l'on fait cela et où la longueur d'onde du rayonnement de la lampe devient de l'ordre de grandeur de la distance entre les deux trous , on ne peut plus distinguer les deux trous , et donc on ne plus déterminer si l'électron est passé par le trou 1 ou par le trou 2. On est donc bien obligé de conclure que la vision classique d'un électron qui passe par un seul trou est fautive : l'électron passe par les deux trous. Un peu comme tout à l'heure, l'électron était à gauche et à droite et on ne pouvait pas dire s'il était à gauche ou à droite. C'est cela la réalité de la mécanique quantique.

Heisenberg a permis de comprendre qualitativement bien des phénomènes quantiques. Il y a en effet deux grandes sources de la mécanique quantique : celle qui, suivant de Broglie, est mise en œuvre par Schrödinger qui cherche l'équation qui régit la propagation de cette onde de de Broglie. Heisenberg poursuit une voie indépendante en étudiant les règles de transition entre niveaux atomiques et il aboutit ainsi à une *mécanique des matrices* a priori sans rapport. C'est, à la suite de Schrödinger, P.Jordan qui montrera l'identité des deux points de vue. En 1927 Heisenberg découvre que dans cette mécanique, des observables peuvent être *incompatibles*. Il prend pour exemple la position et l'impulsion d'une particule. (L'impulsion, est la vitesse de la particule multipliée par sa masse, pour des vitesses petites par rapport à  $c$ ). De la même façon, on n'avait pas encore découvert le spin à l'époque de Heisenberg, mais je me servirai ici de l'exemple du spin : à chaque particule, comme par exemple l'électron, est associé une sorte de vecteur interne qu'on appelle son spin qui, comme tout bon vecteur de l'espace à trois dimensions, a trois composantes :  $S_x$ ,  $S_y$ , et  $S_z$ . Ce sont des observables : on peut mesurer a priori chacune d'entre elles :  $S_x$  ou  $S_y$  ou  $S_z$ . Mais ces observables sont

incompatibles, c'est-à-dire que si l'on mesure  $S_x$ , il faut renoncer à connaître  $S_y$  ou  $S_z$ , et réciproquement. De la même façon, si l'on mesure avec précision la position d'une particule, Heisenberg nous explique pourquoi il faut renoncer à connaître précisément l'impulsion d'une particule. Pour expliquer cela, il introduit par la pensée ce que l'on appelle aujourd'hui *le microscope de Heisenberg* : pour savoir où se trouve une particule, il faut la "voir" et donc interagir avec elle. On peut par exemple envoyer un faisceau lumineux sur cette particule et déduire de l'effet de la particule sur le faisceau sa position. Pour la localiser avec une incertitude de  $\delta x$  près, il faut un rayonnement dont la longueur d'onde soit plus petite que  $\delta x$  ; en effet si la longueur d'onde est supérieure  $\delta x$ , nous n'observerons qu'une image diffuse impossible à "résoudre" en deçà de cette longueur d'onde. Mais alors la relation de de Broglie nous indique que dans ce faisceau lumineux, les photons constitutifs de longueur d'onde  $\lambda$ , ont une impulsion  $p = h/\lambda$ , l'inverse de  $\lambda$ , à une constante près qui est la constante de Planck. Si  $\lambda$  est petit pour bien localiser la particule, cela veut dire que les photons ont une impulsion qui est grande. (Remarque : *c'est exactement pour cela que l'on fabrique des accélérateurs : pour avoir des bons microscopes, il faut des petites longueurs d'onde ; pour avoir des petites longueurs d'onde, il faut des grandes impulsions. Les grandes impulsions, qui impliquent des grandes énergies, ne sont fournies que par des accélérateurs. Les accélérateurs, en quelque sorte, ne sont que de gigantesques microscopes. Le LHC est un microscope qui permet de descendre jusqu'à des longueurs d'onde de quelque chose comme  $10^{-18}$  cm.* ).

Donc, les photons qui servent à localiser la particule en question ont une grande impulsion d'ordre  $h/\delta x$ . Dans ces conditions, parce leur impulsion est grande, la collision entre le photon et la particule va être très "dure" et il va en résulter une grande incertitude  $\delta p$  sur l'impulsion de la particule qui sera supérieure à  $h/\delta x$ . Ainsi l'impulsion de l'électron, que l'on connaissait peut-être avant de mesurer sa position, par exemple parce qu'il était au repos, devient d'autant moins connaissable que l'on a mieux mesuré la position. Ces deux variables sont donc incompatibles et le microscope imaginé par Heisenberg en donne une explication qualitative. Pendant longtemps, on a cru que le caractère un peu paradoxal de la mécanique quantique, tel celui de ces observables incompatibles qui n'existent pas classiquement, se résumait à ce microscope de Heisenberg. En réalité, comme nous allons le montrer tout à l'heure, la situation est bien plus complexe que cela.

Le raisonnement de Heisenberg nous explique néanmoins pourquoi une mesure peut changer l'état du système. De plus il permet de comprendre qualitativement le mystère évoqué ci-dessus de la taille des atomes. En effet, si la taille des atomes diminue, si le rayon de giration d'un électron autour d'un noyau décroît, cela signifie, en suivant le raisonnement de Heisenberg, qu'il est mieux localisé. Plus on le rapproche (par la pensée) du noyau, plus il est bien localisé. Mais si nous améliorons notre connaissance de sa position, nous détériorons, nous démontre Heisenberg, celle de son impulsion ; l'énergie cinétique, qui est proportionnelle au carré de l'impulsion, peut alors prendre des valeurs élevées. Donc, croyant diminuer l'énergie potentielle, nous augmentons l'énergie cinétique. Or la situation que réalise l'électron dans l'état *fondamental* c'est celle qui minimise l'énergie totale : somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle. Plus précisément l'énergie potentielle  $V = -\alpha/r$  diminue bien si l'électron s'approche du noyau. Mais l'énergie cinétique prend, suivant le raisonnement de Heisenberg, des valeurs typiques inversement proportionnelles au carré de la longueur de localisation, qui est de l'ordre de grandeur de la distance  $r$  au noyau :

$$T = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2mr^2}$$

Donc, il se rajoute à l'énergie cinétique une énergie potentielle qui elle croît pour  $r$  petit. La minimisation de l'ensemble donne une longueur optimale : le minimum  $r^*$  de la somme  $T + V$

cette fois-ci n'est pas d'ordre  $10^{-15}$  mètres, taille du noyau, mais  $10^{-10}$  mètres, taille des atomes puisque cette somme atteint son minimum à la distance:

$$r^* = \frac{\hbar^2}{me^2} \sim 10^{-10} m$$



Donc, cette taille gigantesque des atomes, ce vide ahurissant de notre matière, résulte de l'incompatibilité des observables positions et impulsions illustrée par le raisonnement de Heisenberg.

Les plus grands mystères de la mécanique quantique arrivent avec la *mesure*. En mécanique quantique, le résultat d'une mesure est aléatoire, et cet aléatoire semble irréductible. Nous ne sommes plus du tout dans le cadre habituel de l'utilisation du calcul des probabilités en mécanique classique. En effet classiquement on a souvent recours à des probabilités parce que l'on est en présence de systèmes extrêmement complexes. Si nous voulons décrire le moindre gramme de matière, le gigantisme du nombre d'Avogadro, de l'ordre de  $10^{23}$  particules dans tout grain de matière, interdit de suivre l'évolution de tous les degrés de liberté. Par conséquent, on a fréquemment recours à des calculs statistiques ou probabilistes. Mais, a priori cela n'est qu'une commodité destinée à court-circuiter des calculs gigantesques. Ce n'est pas une nécessité. D'ailleurs de nos jours la puissance de calcul des ordinateurs permet de suivre le mouvement de quelques milliers de particules sans avoir à faire le moindre calcul de nature statistique ou probabiliste. Néanmoins l'utilisation des probabilités, la *mécanique statistique*, est en définitive la meilleure voie pour comprendre le comportement de la matière. Mais répétons que les probabilités en mécanique classique ne sont qu'une commodité.

Pour un mathématicien, la notion de probabilité ne pose aucun problème particulier : une probabilité, c'est une mesure sur un ensemble. Ainsi pour une alternative avec 50% pour un terme, et 50% pour l'autre, nous savons calculer la probabilité des divers résultats possibles sans aucun problème. Si on déclare qu'une pièce de monnaie a une chance sur deux de tomber sur pile, le calcul de la probabilité de trouver 100 fois pile pour 200 lancers, ne pose aucun problème au mathématicien. Pour un physicien, c'est très différent : la pièce est un objet physique et la probabilité qu'on va lui affecter n'est qu'une estimation qui repose sur notre connaissance de cette pièce. Si nous n'avons pas de raison de penser que la pièce est biaisée, nous lui affecterons a priori une probabilité  $\frac{1}{2}$ , quitte à changer de point de vue si on s'aperçoit en la lançant que 50% ne convient pas. Notons que la probabilité n'est pas une caractéristique de la pièce, c'est une simple commodité pour court-circuiter un long calcul. A priori, on pourrait imaginer, lançant une pièce, bien modéliser la façon dont on la lance, dont elle tourne dans l'air, dont elle tombe sur la table, et sans faire aucun calcul probabiliste, on pourrait essayer de déduire sur quelle face elle tombe selon les conditions de l'expérience. A priori, cela est possible en mécanique classique, même si c'est très compliqué. Mais en mécanique quantique, la notion de probabilité n'est pas de cette nature : elle est irréductible,

il n'existe pas de façon permettant d'éviter l'introduction de variables aléatoires. Cela va être encore illustré ci-dessous.

Revenons au spin de l'électron, ce vecteur qui lui est attaché. Le résultat de la mesure d'une composante de ce spin, le long d'un axe appelé  $z$ , est soit  $+$ , soit  $-$ , dans des unités qui sont liées à la constante de Planck. Donc, deux valeurs possibles  $\pm \hbar/2$ , désignées tantôt par  $+/-$ , tantôt avec une flèche vers le haut ou vers le bas. Deux valeurs possibles et rien d'autre. C'est déjà très différent de la mécanique classique, car si l'on mesure en mécanique classique la composante d'un vecteur le long d'un axe, le résultat, qui dépend de l'angle que fait ce vecteur avec l'axe, peut-être toute valeur comprise entre la longueur du vecteur et son opposé. Ce n'est pas comme ça en mécanique quantique. Il faut l'admettre, c'est là le résultat de la mesure. Mais il y a des choses plus compliquées que cela : si l'état du spin avant la mesure était un état  $|\psi\rangle$ , après la mesure qui a produit le résultat  $+$  le long de l'axe des  $z$ , par exemple, ( $+$  cela veut dire  $+\hbar/2$ ), l'état est devenu un état de spin vers le haut. La mesure a changé l'état du système. Cela ne paraît pas extrêmement paradoxal en soi, si l'on se souvient du microscope de Heisenberg : la mesure a perturbé le spin, mais tout de même cela pose immédiatement la question de ce qu'est une mesure. D'abord nous nous retrouvons maintenant avec deux principes d'évolution. Le premier est celui que nous évoquions ci-dessus ; connaissant l'état initial, nous pouvons en déduire l'état à l'instant  $t$ , par exemple par l'équation de Schrödinger :  $|\psi(0)\rangle \rightarrow |\psi(t)\rangle$ . Mais, la mesure introduit un deuxième principe d'évolution, appelé *postulat de réduction*, puisque si l'état avant mesure est  $|\psi\rangle$ , après avoir pris connaissance du résultat, celui-ci est changé en :  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi\rangle$ . Cela pose aussi la question de savoir à quel moment fait-on la mesure, qu'est-ce qu'une mesure ?

Pourrait-on s'affranchir de cette deuxième loi d'évolution spécifique de l'opération de mesure ? Pour cela on pourrait tenter de décrire l'appareil de mesure comme un élément complémentaire du monde physique considéré. Nous serions amenés ainsi à considérer l'ensemble constitué par (i) le système qui est initialement dans un état  $|\psi\rangle$  (ii) l'appareil de mesure qui est dans un état  $|\chi\rangle$  ; nous pourrions tenter de décrire l'évolution de l'état de l'ensemble  $|\psi, \chi\rangle$ , c'est-à-dire de l'ensemble (électron, appareil de mesure). Est-ce que l'évolution  $|\psi, \chi\rangle(0) \rightarrow |\psi, \chi\rangle(t)$  de l'ensemble, étudiée par une équation de Schrödinger gigantesque dans laquelle nous mettons aussi l'évolution de l'appareil de mesure et son couplage avec le système étudié, est-elle susceptible d'expliquer ce deuxième principe, i.e. la réduction de l'onde initiale à partir de l'équation d'évolution ? Comme nous allons le voir tout à l'heure, la réponse est probablement NON : l'opération de mesure n'est pas une étape que l'on va pouvoir traiter comme pour le système étudié, par la dynamique quantique ordinaire. Le caractère aléatoire de la mesure se réduit-elle au microscope de Heisenberg, c'est-à-dire à l'inévitable perturbation du système étudié par l'appareil de mesure ? Eh bien, là encore la réponse est non, comme nous allons le voir dans quelques instants.

Je reviens aux paradoxes qui n'ont cessé de hanter la mécanique quantique. Parmi les plus célèbres figurent ceux « du chat de Schrödinger » et « de l'ami de Wigner », pour reprendre leurs noms devenus classiques. Qu'est-ce que le chat de Schrödinger ? L'image célèbre résulte de discussions, où s'illustrèrent Bohr et Schrödinger. La question était de savoir si le caractère étrange du monde quantique pouvait être transporté au monde macroscopique usuel. Pour cela ils imaginaient une particule radioactive ; celle-ci se trouve dans un état excité avant d'avoir émis son rayonnement, et en l'émettant elle se désexcite. Mais elle peut être dans un état ou dans l'autre. Pour une telle particule, il est bien connu qu'elle peut se trouver dans l'un ou l'autre des deux états, ou dans toute superposition de ces deux états. Mais maintenant, disait Schrödinger, imaginez que cette particule radioactive soit

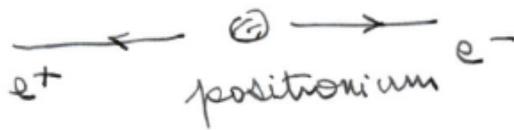
dans une enceinte où il y a un chat. On a bien fermé la boîte, on ne regarde pas à l'intérieur ; si la particule s'est désintégrée avant d'ouvrir la boîte, alors le rayonnement a tué le chat ; si elle ne s'est pas désintégrée, le chat est toujours vivant. Donc le chat, comme la particule peut être dans deux états : un état |chat-vivant> ou un état |chat-mort>, ou encore, tant que nous n'avons pas regardé à l'intérieur de la boîte, on peut avoir des superpositions d'états pour l'objet macroscopique "chat" lui-même. Avant d'ouvrir la boîte pour regarder l'état du chat, celui-ci peut se trouver dans une superposition |chat-vivant> + |chat-mort>. Voilà qui paraît absurde, bien plus qu'une superposition d'états pour une particule. Que peut-on en penser ? J'espère que Jean Michel Raimond qui a fait beaucoup d'expériences sur des cavités avec des photons, nous parlera des expériences explicites qui montrent comment on passe d'un objet microscopique à un état macroscopique. Tel est, ici, le premier paradoxe.

Le deuxième paradoxe porte le nom de "l'ami de Wigner" : quand on ouvre l'enceinte où se trouve le chat, on réduit l'état |vivant> + |mort> à l'état |chat-vivant> ou à l'état |chat-mort> suivant l'état dans lequel on trouve l'animal. Mais, si c'est l'ami de Wigner qui regarde, et ne lui communique le résultat que longtemps après, à quel moment Wigner doit-il réduire l'état qu'il attribue au chat? Nous sommes donc face à une conclusion proprement ahurissante qui est que c'est la prise de conscience qui produit la réduction. Dans ce point de vue nous sommes obligés d'introduire la conscience de l'observateur pour opérer la réduction de l'état. Voilà qui nous gêne évidemment beaucoup, et encore davantage lorsqu'on applique la mécanique quantique à l'étude de l'évolution de l'univers primitif bien avant qu'il y ait le moindre observateur. Que signifie alors prise de conscience ?

Il y a une façon de s'en sortir, mais là je marche sur des œufs. Notre confrère d'Espagnat y a plus réfléchi que quiconque. Il n'y a pas de paradoxe, me semble-t-il, si l'état du système, tel que l'observateur le prend dans sa description du système, correspond à sa propre connaissance subjective de ce système.

Autrement dit, tant que je n'ai pas fait d'observations, que je décrive le chat dans un état |chat-vivant> + |chat-mort> n'a rien de choquant ni de paradoxal : c'est ma connaissance du système, je le décris de cette façon là en l'absence d'une mesure ultérieure qui me conduira à changer ma description. (Permettez-moi d'évoquer des conversations avec Rudolf Peierls dans lesquelles celui-ci affirmait qu'il n'y avait aucun paradoxe si l'on considérait que l'état attribué au système par l'observateur n'était que le reflet de sa connaissance propre du système). Mais dans ces conditions, on ne sait plus très bien où est la réalité physique dans cette description subjective du monde. Existe-t-il une réalité physique indépendante de l'observateur ? Nous préférerions de beaucoup pouvoir dire que le postulat de réduction lié à la mesure est une commodité qui remplace la description d'un appareil de mesure compliqué. Combien il serait satisfaisant de penser que si nous mettions l'appareil de mesure dans les équations, nous pourrions éviter de problème de la mesure et de sa subjectivité. Or, comme vous l'allez voir ce n'est probablement pas possible.

En effet, en 1935, les choses se compliquent considérablement avec un article célèbre qui suscitera à l'époque beaucoup d'intérêt de la part de Schrödinger et de Bohr, qui en discuteront beaucoup avec Einstein, mais qui par la suite va rester longtemps oublié. Dans les années où j'étais jeune physicien, on considérait généralement qu'il n'y avait aucune difficulté, que la mécanique quantique marchait parfaitement, qu'Einstein, Podolsky et Rosen s'étaient arrêtés sur des questions sans intérêt. Ce n'est qu'après l'article de John Bell de 1964 que la situation devait et que le *paradoxe EPR* devait redevenir progressivement le centre de beaucoup d'attention. EPR imaginent une particule, par exemple le positronium, qui se désintègre en un électron et un positron ; dans le système du laboratoire où le positronium était au repos l'électron et le positron s'éloignent dans des directions opposées.



Quant à leurs spins, celui de l'électron et celui du positron, ils sont dans un état *intriqué* qu'il nous faut décrire. L'électron et le positron émis ont tous deux un spin ; la conservation du moment cinétique (conséquence de l'invariance par rotation) implique que leurs spins, mesurés le long de tout axe, sont opposés. Nous voyons aisément ce que serait l'état  $|+, -\rangle$  dans lequel le spin de l'électron serait positif, et celui du positron négatif. Il en est de même pour l'état de spins opposés  $|-, +\rangle$ . Mais la mécanique quantique impose que ces deux particules sont émises dans l'état  $|+, -\rangle + |-, +\rangle$ , dans lequel on ne peut plus dire vraiment, ni pour l'électron, ni pour le positron, ce qu'est son spin. Imaginons que dans ces conditions un premier expérimentateur (de nos jours conventionnellement appelé Alice) mesure le spin de l'électron et trouve un résultat positif. Cela implique que l'état initial de spin  $|+, -\rangle + |-, +\rangle$  a été réduit par la mesure à l'état  $|+, -\rangle$ . Par conséquent après cette mesure qui a trouvé un résultat positif pour l'électron nous savons avec certitude qu'un deuxième expérimentateur (Bob) arbitrairement éloigné d'Alice, qui a décidé de mesurer le spin du positron va trouver un résultat négatif. Cela apparaît à EPR comme extraordinairement choquant : Alice en mesurant peut prédire par sa mesure le résultat que va trouver Bob. Certes il n'y a pas violation de la *causalité* relativiste, qui postule qu'aucune information ne peut être transmise à vitesse supra-luminale. L'expérience terminée, les deux observateurs se retrouvent. La liste des résultats obtenus par Alice, parce que l'expérience est répétée un grand nombre de fois, est, mettons,  $\{+, -, -, +, -, -, -\}$  ; elle sait que Bob lui produira la liste opposée :  $\{-, +, +, -, +, +, +\}$ . Elle n'a pas besoin de regarder la liste 2 pour le savoir. Mais Alice ne peut dire antérieurement à Bob ce qu'il va trouver que par une transmission d'information ordinaire.

Pendant longtemps donc, on a considéré que cela après tout n'était pas si grave. Je vais essayer de vous montrer à quel point pourtant c'est choquant. (Nous sommes bien là au cœur des problèmes de la connaissance). D'une certaine façon, on peut superficiellement imaginer que la situation EPR n'a rien de plus choquant que l'expérience banale suivante : j'arrive à mon bureau, je fouille dans ma poche, je trouve un seul gant, un gant de main droite ; je sais alors que celui que j'ai oublié à la maison est un gant de main gauche. Rien de paradoxal ou de mystérieux : je le sais instantanément et si je veux transmettre l'information à quelqu'un qui est resté chez moi, je téléphone pour dire que le gant qui est sur la commode est un gant de main gauche. Mais ce qu'il y a de plus complexe ici est l'expérience suivante : imaginez que, avant de partir dans leurs laboratoires respectifs où ils vont analyser les particules jumelles émises, Alice et Bob conviennent qu'ils vont mesurer tous les deux la composante des spins sur l'axe des  $x$ . Là, on sait que si l'un trouve  $+$ , l'autre va trouver  $-$ , avec certitude. Mais imaginez que, faisant une plaisanterie à son collègue, Alice au lieu de mesurer  $S_x$ , mesure la composante  $y$  sans le lui dire. Alors elle sait que Bob qui continue à mesurer toujours  $S_x$ , au lieu de trouver un résultat bien déterminé, va trouver avec 50% de probabilité  $S_x = +$  ou bien  $S_x = -$ . Donc, si Alice respecte la règle du jeu, Bob va trouver  $S_x$  opposé au sien ; si elle ne la respecte pas, il aura 50% de chance de trouver  $+$  ou de trouver  $-$ . Autrement dit, le résultat effectif de ce que va trouver l'observateur 2 dépend de ce que fait l'observateur 1. C'est un peu comme si je vous disais : si je suis magicien et que je transforme

ma main droite en une main gauche, j'ai aussi transformé celui qui était chez moi de main gauche à main droite.

Remarque ajoutée après correspondance avec B. d'Espagnat et F. Laloë : Cette situation n'est néanmoins pas suffisante pour caractériser "l'étrangeté" de la mécanique quantique : on pourrait qualitativement reproduire par la pensée la même étrangeté dans une représentation évoquée un peu plus bas dans le texte où les spins sont décrits à l'aide de variables cachées. Seules les considérations quantitatives tirées de l'inégalité de Bell permettent pour l'expérience EPR de faire la différence entre mécanique quantique et théories locales à variables cachées (pour être précis, convenons d'appeler ainsi toute théorie à variables cachées qui, contrairement à celle de Bohm, ne soumet pas les variables en question à des influences induisant effets à distance).

Cela implique que la mesure est un processus non local. Encore une fois ce n'est pas une violation de la causalité relativiste, c'est une violation de la localité de la mesure. Revenons à ce que nous disions tout à l'heure : si j'imaginai que la mesure du spin de l'électron est une interaction entre celui-ci et l'appareil de mesure contenu dans le laboratoire d'Alice, elle serait localisée à l'ensemble (appareil de mesure, système étudié). Or dans la situation EPR, bien que le positron soit parti au loin, la mesure du spin de l'électron a également mesuré le spin du positron. La mesure ne se réduit donc pas à une interaction locale avec un appareil macroscopique. Ceci nous dit que, vraisemblablement, on ne peut pas inclure l'appareil de mesure dans le système étudié. Car si on incluait l'appareil de mesure dans l'équation d'évolution on ne mettrait que des interactions locales entre le système étudié et l'appareil. Cette non localité de l'opération de mesure montre que, vraisemblablement, il n'est pas possible de se passer du postulat numéro 2 de réduction de l'onde. De nos jours cette expérience est réalisée de manière courante avec des photons jumeaux (on vend même des systèmes de cryptographie qui reposent sur ces photons jumeaux ; dans des fibres optiques des photons jumeaux s'éloignent à des kilomètres l'un de l'autre. Cette expérience de pensée d'EPR est devenue aujourd'hui un objet pratique qui sert à savoir si une communication entre Alice et Bob a ou n'a pas été espionnée. C'est ce qu'on appelle la *cryptographie quantique*. Si un espion a intercepté la communication, la corrélation absolue qu'il y avait entre les états de polarisation des photons jumeaux sera perdue).

#### Dernier point : variables cachées, un substitut à la mécanique quantique ?

Examinons sur quels points la mécanique quantique diffère de la mécanique classique. Par exemple, nous avons vu que la mesure du spin le long de  $Ox$  ou la mesure du spin le long de  $Oy$  sont des variables incompatibles. Si l'on mesure  $S_x$ , et que le résultat est par exemple positif, la mesure de  $S_y$  est complètement aléatoire et donne tantôt +, tantôt -, avec des probabilités égales. C'est ce que dit la mécanique quantique. On pourrait interpréter ce résultat en pensant qu'il vient de ce que l'appareil de mesure a modifié la particule dont on mesure le spin. Cette modification serait telle que, une fois que nous connaissons  $S_x$ , alors  $S_y$  devient indéterminé, de la même façon que, une fois mesurée la position, l'impulsion était indéterminée. Donc, dans cette vision de Heisenberg "naïve", c'est la mesure de  $S_x$  qui empêche de connaître  $S_y$ . Or nous allons voir que la situation est plus compliquée encore.

Une façon de se "représenter" cela est d'imaginer qu'en réalité, la population des électrons, par exemple, est constituée de quatre types de particules : il y a celui pour lequel  $S_x$  et  $S_y$  sont positifs (+,+), celui pour lequel  $S_x$  est positif et  $S_y$  négatif (+,-), le type (-,+), et le type (-,-). Quatre types avec des populations que j'appelle  $N_1, N_2, N_3, N_4$ . Donc la mesure de  $S_x$  va produire un résultat positif + avec une probabilité qui est le rapport du nombre de cas favorables  $N_1 + N_2$ , le nombre de particules qui ont un  $S_x$  positif, divisé par le nombre total :  $(N_1 + N_2)/(N_1 + N_2 + N_3 + N_4)$ . Après avoir mesuré  $S_x$ , j' imagine que je renonce à connaître

$S_y$  car la mesure de  $S_x$  a trop perturbé le système. Notons que nous sommes sortis ici du cadre quantique en imaginant ces quatre types de populations, car celle-ci ne dit pas qu'il existe des particules de type  $S_x$  positif,  $S_y$  positif, etc. Elle dit simplement qu'après avoir mesuré  $S_x$  le résultat pour  $S_y$  est aléatoire, avec probabilités égales. Cette limitation n'est pas remise en cause par les tenants des *variables cachées*, ici ce remplacement de la description quantique par l'introduction de ces quatre types de particules qui ne sont pas accessibles à nos mesures mais fournissent une représentation du système. Cela a paru pouvoir être une représentation alternative des mêmes faits physiques.

Pendant longtemps, cette interprétation s'est opposée à la mécanique quantique car cette dernière n'admet pas de parler d'un des types, tel  $S_x$  positif,  $S_y$  négatif, car on ne peut pas les mesurer simultanément. La mécanique quantique insiste sur le fait qu'on ne peut concevoir que ce qui est mesurable. Elle refuse l'idée d'une réalité sous-jacente plus fine qui nous resterait cachée parce que nos appareils de mesure sont trop grossiers et perturbent violemment le système. La mécanique quantique affirme qu'il n'y a pas de réalité plus fine. Pendant longtemps, mécanique quantique et variables cachées sont apparues comme deux points de vue opposés, mais en quelque sorte équivalents dans leurs prédictions pratiques des résultats de mesure. On parlait d'une autre interprétation de la mécanique quantique. Cela paraissait être un cadre alternatif mieux adapté pour se faire une idée plus intuitive de ce qui se passe.

Cela a pris fin quelques années après une contribution importante d'un théoricien irlandais, que vous (Bd'E) avez dû bien connaître au CERN, John Bell. Celui-ci a montré en 1964 (ce n'était pas ce qu'il cherchait à montrer à l'époque) qu'aucune théorie physique remplaçant la mécanique quantique par une théorie locale à variables cachées n'est compatible avec celle-ci. On ne peut pas reproduire la mécanique quantique par une telle théorie. Ces deux points de vue ne sont pas équivalents. L'un et l'autre s'opposent à travers une inégalité simple démontrée par Bell. Je vais essayer de vous donner une version intuitive, sans calcul, de ce que c'est qu'une inégalité de Bell. Pour cela, je considère un modèle simple de variables cachées, dû à Eugène Wigner, qui prolonge la discussion ci-dessus sur les quatre types de spins. Eugène Wigner considère une situation de type EPR, donc deux particules émises avec des spins opposés. Deux expérimentateurs peuvent mesurer les valeurs des spins,  $S_1$  et  $S_2$ , le long de trois axes  $Oa$ ,  $Ob$  et  $Oc$ . Dans une interprétation non quantique, chacune des deux particules peut être dans l'un des types suivants : la première par exemple peut être dans le type : le long de  $Oa = +$ , le long de  $Ob = +$ , le long de  $Oc = +$ , i.e.  $(+,+,+)$ , etc. Il y a huit possibilités qui vont de  $(+,+,+)$  à  $(-,-,-)$  :  $\{(+,+,+), (+,+,-), (+,-,+), (+,-,-), (-,+,+), (-,+,-), (-,-,+), (-,-,-)\}$ .

Voilà pour la première particule. Si, par exemple, elle est dans l'état  $(+,+,-)$  et si je choisis de mesurer  $S_a$  je trouverai  $+$  et si je mesurais  $S_c$ , je trouverais  $-$ . Dans la situation EPR, si la particule 1 est dans l'état  $(+,+,-)$ , alors on sait que la particule 2 est dans l'état opposé  $(-,-,+)$ , et même chose pour les huit types en question.

Décrivons l'expérience EPR dans les deux points de vue (i) variables cachées avec ces 8 possibilités pour chaque particule (ii) mécanique quantique.

Variables cachées : Chaque particule est dans l'un des huit états possibles, les spins des deux particules restant opposés, i.e. première particule  $(+,+,+)$ , deuxième  $(-,-,-)$ ; première particule  $(+,+,-)$ , deuxième  $(-,-,+)$ , etc. Au total donc huit possibilités pour lesquelles on connaît les populations :

	1	2
$N_1$	$(a+, b+, c+)$	$(a-, b-, c-)$
$N_2$	$(a+, b+, c-)$	$(a-, b-, c+)$
$N_3$	$(a+, b-, c+)$	$(a-, b+, c-)$
$N_4$	$(a+, b-, c-)$	$(a-, b+, c+)$
$N_5$	$(a-, b+, c+)$	$(a+, b-, c-)$
$N_6$	$(a-, b+, c-)$	$(a+, b-, c+)$
$N_7$	$(a-, b-, c+)$	$(a+, b+, c-)$
$N_8$	$(a-, b-, c-)$	$(a+, b+, c+)$

On imagine qu'on répète cette expérience EPR un grand nombre de fois. Supposons qu'Alice mesure  $S_a$  et que Bob mesure  $S_b$ . Quelle est la probabilité pour que Alice trouve + (le long de  $Oa$ ) et que Bob trouve + le long de  $Ob$  ? Pour qu'Alice trouve + le long de  $Oa$ , j'ai les quatre premières possibilités mais seules la troisième et la quatrième sont compatibles avec le fait que Alice trouve  $a+$  et Bob trouve  $b+$ . Donc la probabilité  $P(a+, b+)$  de  $(a+, b+)$  est  $N_3 + N_4 / N$  (où  $N = N_1 + \dots + N_8$  est le nombre total de cas possibles). Si Alice mesure  $S_a$  et Bob  $S_c$ , je trouve  $P(a+, c+) = N_2 + N_4 / N$ . Si Alice mesure  $S_c$  et Bob  $S_b$ , la probabilité donne  $P(c+, b+) = N_3 + N_7 / N$ , etc. Vous voyez que si j'ajoute  $P(a+, c+)$  et  $P(c+, b+)$ , je trouve  $N_2 + N_4 + N_3 + N_7 / N$  qui est supérieur à  $P(a+, b+) = N_3 + N_4 / N$  puisqu'il y a des termes en plus :

$$P(a+, c+) + P(c+, b+) = \frac{N_2 + N_4 + N_3 + N_7}{N} \geq \frac{N_3 + N_4}{N} = P(a+, b+)$$

Voilà une inégalité de Bell : la probabilité de  $(a+, c+)$  ajoutée à la probabilité de  $(c+, b+)$  est, dans ce modèle de variables cachées, supérieure à la probabilité de  $(a+, b+)$ . Voilà, ce que dit de manière très naïve cette théorie de variables cachées.

Mécanique quantique On sait calculer la probabilité de  $(a+, b+)$  ; je prends le résultat qui figure dans tous les cours de mécanique quantique,

$$P(a+, b+)_{MQ} = \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

où  $\theta$  est l'angle entre  $a$  et  $b$ .

Pour la première fois, c'est ce qu'a vu Bell, il y a une prédiction des variables cachées et il y a un calcul de mécanique quantique. Sont-ils ou ne sont-ils pas compatibles ?

Particularisons la configuration : prenons trois vecteurs  $a, b, c$  coplanaires :  $a$  et  $b$  sont perpendiculaires, et  $c$  est la bissectrice de l'angle  $(a, b)$ . Pour  $P(a+, c+)$ , la mécanique quantique nous dit que c'est la moitié du sinus carré de 45 degré divisé par 2, ce qui donne à peu près 0,0732 :  $P(a+, c+) = \frac{1}{2}(\sin^2(45^\circ/2)) \sim 0,0732$ . Même chose pour  $P(b+, c+)$ .

Mais pour  $(a+, b+)$  l'angle entre  $a$  et  $b$  est de  $90^\circ$ , le  $\sin^2$  de  $45^\circ$  est  $\frac{1}{2}$  et donc  $P(a+, b+)$  donne  $\frac{1}{2}(\sin^2(90^\circ/2)) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = 0,25$ . Or  $0,25$  est supérieur à  $0,0732 + 0,0732$  :  $P(a+, b+)$  est supérieur à  $P(a+, c+) + P(b+, c+)$ .

Ce résultat de la mécanique quantique viole donc l'inégalité de Bell qui, reposant sur des variables cachées, aboutissait à une inégalité en sens contraire. Une proposition d'expérience fut alors élaborée (J. F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony and R. A. Holt, *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Phys. Rev. Lett. 23, 880-884 (1969)) et la mise en œuvre, avec des améliorations de plus en plus raffinées pour éliminer toute interaction causale entre "Alice et Bob", fut entreprise par Alain Aspect et son équipe (A. Aspect et al., *Phys. Rev. Lett.* 47, 460 (1981); 49, 91 (1982); 49, 1804 (1982)).

L'expérience a démontré que le résultat de la mécanique quantique était imparable : l'inégalité de Bell est violée, et elle est violée massivement. Il y a même maintenant des processus expérimentaux dans lesquels elle est violée totalement (proposition initiale de

Greenberger, Horne, Zeilinger 1989, réalisation en 1998 par Bouwmester et al.). Des impossibilités classiques sont réalisées à 100% dans le cas quantique.

Il est donc indubitable que la mécanique quantique et les variables cachées locales sont incompatibles. Cela nous condamne à cette mécanique quantique bizarre, bizarre parce que pas intuitive. Nous ne savons pas très bien ce que veut dire une mesure, et en tout cas, son caractère non local est quelque chose d'ahurissant. Mais, c'est une réalité expérimentale.

Aujourd'hui ? Aujourd'hui, la mécanique quantique décrit tous les phénomènes atomiques et subatomiques connus à ce jour. Cela a été le grand triomphe de Feynman, Schwinger et Tomonaga de comprendre, dans les années de l'immédiat après-guerre, la compatibilité de la mécanique quantique et des interactions électromagnétiques. Cela a été le grand triomphe des années 1970 de comprendre la compatibilité entre la mécanique quantique et les forces nucléaires faibles et fortes. Ce qu'on appelle aujourd'hui le modèle standard. Mais les propositions qui tendent à rendre compatibles la mécanique quantique et la théorie d'Einstein de la dernière force qui n'est pas incluse dans ce qui précède, i.e. la gravitation, ne sont actuellement que de pures conjectures sans contrepartie expérimentale à l'heure présente.

Divers théoriciens, en particulier 't Hooft, ont souligné les difficultés de la théorie quantique en présence de trous noirs. Vous savez que les trous noirs sont aujourd'hui une réalité. On a même découvert il y a moins de dix ans, qu'au centre de notre galaxie, il y a un gros trou noir de quelques millions de masses solaires. Donc, ce n'est pas une conjecture: il existe des trous noirs. 't Hooft avait le premier signalé que si on avait un trou noir, ce qu'on appelle l'unitarité, c'est-à-dire la conservation de l'information, est a priori violée. Un état pur va se transformer en ce qu'on appelle un mélange, une matrice densité, ce qui est une perte d'unitarité. Tout cela est un peu technique : il faudrait y revenir dans un exposé en soi. Mais, après que Hawking ait montré que, quantiquement, un trou noir "s'évaporait", les physiciens se sont demandé si ce rayonnement produisait une restitution de l'information compatible avec la mécanique quantique. La théorie des supercordes l'affirme et je crois que c'est un de ses triomphes, même si, pour l'instant, elle n'a aucune vérification expérimentale (voir sur ce thème le livre récent de Leonard Susskind *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics.* )

Quoi qu'il en soit, à l'échelle de cette longueur qu'avait introduite Planck, pour des raisons dimensionnelles, qui mélange la constante de Newton, la vitesse de la lumière et la constante de Planck ( $l_P = (Gh/2\pi c^3)^{1/2} \sim 1,6 \times 10^{-35} \text{m}$ ) une échelle de grandeur extraordinairement petite, bien plus petite que tout ce que l'on sait mesurer aujourd'hui (au CERN on atteint les  $10^{-20}$  mètres), à cette échelle nul ne sait ce qu'il se passe. Pour l'instant la validité de la mécanique quantique à cette échelle de la longueur de Planck reste une question ouverte. Peut-être, un jour, à cette échelle là, faudra-t-il modifier la mécanique quantique. Quand bien même serait-elle modifiée à cette échelle, à nos échelles pour toutes les expériences qui sont faites dans nos laboratoires, il n'existe pas et il n'existera pas de substitut à la mécanique quantique, de la même façon que la théorie de la relativité n'a pas remis en cause l'application de la théorie de Newton à tout ce qui concerne la physique macroscopique des mouvements des planètes. Donc, il ne fait pas de doute que la validité de la mécanique quantique ne sera pas remise en cause, quand bien même à l'échelle de la longueur de Planck il y aurait des modifications conceptuelles, pour l'instant totalement inconnues. Voilà où nous en sommes avec, comme le disait Feynman, tout autant pour le physicien que pour le novice, une grande difficulté à se faire une vision intuitive de ce que peut être une mesure.

## DISCUSSION

**BdE** : Un grand 'Merci', cher Edouard Brézin, pour cette magnifique introduction à nos travaux. Avec la superposition, la théorie de la mesure, les problèmes de non localité et ainsi de suite, nous venons de parcourir tout un éventail de questions aussi redoutables que fondamentales. Autant de pain sur la planche pour nos futurs travaux !  
Je suppose qu'il y a des questions. Léna Soler.

**LS** : Je commencerais bien par une petite mise en perspective qui engage un peu l'orientation générale de notre travail. Il me semble que notre travail s'intitule « apports de la physique contemporaine à la théorie de la connaissance ». Il faudrait qu'on se mette d'emblée dans une perspective large, qui en particulier ne présuppose pas au départ que la physique s'interprète nécessairement dans un sens réaliste, au sens large ; c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échappatoire au fait de considérer que nos théories physiques et la manière dont on les interprète aujourd'hui nous disent quelque chose sur le réel. Je pense qu'il faudrait quand même aussi qu'on puisse prendre au sérieux le questionnement de cette hypothèse, que peut-être, peut-être... je sais quelles sont les positions et les orientations de, au moins, certains d'entre nous ici sur cette question...

Il faudrait aussi qu'on puisse prendre au sérieux la possibilité d'interprétations, disons, instrumentalistes des théories scientifiques ; où il s'agirait d'un outil qui nous permet de faire des choses, de répondre à un certain nombre de questions, mais qui ne soit pas forcément une interprétation littérale. Il me semble également qu'il faudrait qu'on puisse prendre en compte la possibilité de plusieurs interprétations. Là, en l'occurrence dans le cas de la physique quantique, on a quand même une interprétation alternative. Encore faut-il la prendre au sérieux. Il me semble que ce que vous nous avez présenté aujourd'hui d'une manière complètement intuitive et très parlante, c'est le caractère contre-intuitif d'une certaine interprétation du formalisme, qui est celle qu'on enseigne majoritairement aujourd'hui. Mais je ne suis pas sûre que ce soit incontournable dans la mesure où il existe quand même l'interprétation dite de Bohm qui est associée à un scénario très différent, à une théorie de la mesure très différente. J'ai donc assez envie de vous interroger sur votre position par rapport à cette autre possibilité, avant de rentrer dans les détails.

**EB** : La mécanique quantique, ce sont un certain nombre de prescriptions qui permettent, face à un processus, d'essayer, si on connaît bien les forces en présence, de décrire ce qu'on va trouver lorsqu'on fait une mesure, lorsqu'on interroge ce système. La mécanique quantique est bien définie. Au delà de ça, il y a quelle représentation : peut-on se faire une image des règles que l'on a appliquées et de ce qu'il y a de sous-jacent ? L'interprétation la plus intuitive, proposée par de Broglie, qu'avait, je crois, favorisée Einstein, et qu'avait en tête, je crois, John Bell lorsqu'il a produit cette inégalité est bien celle de variables cachées. Je crois que même si Bell s'était attendu à ce que l'expérience penche du côté des variables cachées locales, il avait admis que l'expérience avait tranché "*It now seems that the non-locality is deeply rooted in quantum mechanics itself and will persist in any completion.*" Néanmoins il était resté attaché à l'espoir d'un formalisme objectif *observer-free* de la mécanique quantique. Ajoutons que si les variables cachées sont non locales, on ne voit plus très bien en quoi ce sont des variables cachées, car elles ne sont plus attachées au système mais également à des entités complètement séparées : la situation est alors plus bizarre encore que celle de la mécanique quantique. Donc, je ne crois pas qu'il soit exact de dire qu'il y a une interprétation qui est la mécanique quantique et d'autres qui s'y opposent. Non, il y a les règles de la mécanique quantique qu'aucune expérience n'a mises en défaut et il y a l'interprétation, la

vision intuitive qu'on peut essayer de s'en faire. Il est vrai qu'il y a une autre vision que je connais mal développée à la suite de de Broglie par David Bohm. Mais, ce n'est pas une remise en cause de la mécanique quantique. Comment à partir de là, s'en faire une représentation ? Si celle de David Bohm vous aide et si elle n'a pas de contradiction, je veux bien. Quant à moi, je n'en vois pour l'instant aucune qui m'aide à me faire une représentation intuitive.

*(Note ajoutée à la relecture : à mon sens cette mécanique de Bohm ne fournit pas un cadre "intuitif" bien simple ; elle est complètement non locale. De plus, pour ne prendre qu'un minuscule exemple, lorsque la fonction d'onde est réelle la particule pilotée par l'onde est immobile : ainsi un électron dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène est immobile, en ce qui me concerne une représentation étrange de l'orbite électronique).*

Je suis devant ce réel, avec ces expériences, comme celles d'Aspect et al. qui me montrent que tout ce que je pouvais avoir de naïf et d'intuitif pour comprendre ce que c'était qu'une mesure disparaît. Voilà tout ce que je peux vous dire. S'il y a d'autres ... Je ne suis pas un théoricien de la connaissance.

Le grand progrès de Bell a été de dire : il n'y a pas que des "interprétations" ; il y a deux façons de regarder les choses, il y a la mécanique quantique et il y a les variables cachées locales et ça ne conduit pas nécessairement aux mêmes résultats. Donc, ce qui serait intéressant, ce serait d'arriver à montrer que ce formalisme de Bohm, quelque part, conduit à quelque chose de mesurable différent de la mécanique quantique. Auquel cas, il m'intéresserait considérablement. Ou bien est-ce que c'est une interprétation qu'on s'en fait. Si c'est une interprétation qu'on s'en fait, alors elle ne m'aide pas beaucoup personnellement.

**LS :** Moi, je ne connais pas très bien. Mais, par exemple, eux ils disent qu'ils ont résolu le problème de la mesure. Je connais pas assez, Hervé connaît sans doute ceci mieux que moi. Pour eux, il n'y a plus de problème de la mesure dans cette interprétation, par exemple.

**EB :** Oui, peut-être. Est-ce que Jean-Michel a un commentaire à apporter ? Tu as réfléchi à cela ?

**JMR :** Je connais très mal le formalisme de Bohm. Autant que je sache, c'est une extension du formalisme d'onde guidée, d'une particule guidée par une onde de probabilité. Ce formalisme décrit très bien le mouvement des particules. Je ne sais s'il peut décrire tout ce que décrit la mécanique quantique standard et s'il a été appliqué avec succès à décrire toutes les situations, y compris l'intrication massive, la physique des solides, etc, que décrit la mécanique quantique standard. D'autre part, ce que nous disent Bell et les expériences d'Aspect c'est que ce formalisme forcément obéit à des équations d'évolution non locales, qui sont donc, d'un point de vue conceptuel aussi choquantes que la mécanique quantique. En un mot, je souscris tout à fait à ce que disait Edouard il y a une minute. Ce qui est choquant dans la mécanique quantique n'est pas tellement l'interprétation qu'on en fait mais les résultats de l'expérience. Et cela, dans une certaine mesure, si tant est qu'on accorde foi à l'expérience, mais sinon on arrête de faire de la physique, cela est la chose contre-intuitive. Après, qu'on mette cette contraintivité sur l'approche standard copenhagienne à laquelle je souscris tout à fait, ou qu'on la mette dans des équations de propagation de l'onde de probabilité qui sont complexes non locales et horriblement compliquées, c'est un peu une question de choix. Mais il faut savoir si les exposés alternatifs sont équivalents ou pas. Et ça c'est une chose dont on pourrait discuter techniquement avec des vrais représentants de ces points de vue. Sont-ils équivalents ou pas et ont-ils une puissance prédictive équivalente ?

**LS :** Normalement oui.

**JMR** : Peuvent-ils adresser tous les problèmes ?

**LS** et **SR** : Ils sont empiriquement équivalents. On a montré qu'ils étaient empiriquement équivalents mais associés à un scénario différent.

**EB** : Y compris dans les situations EPR ?

**SR** : A ma connaissance oui.

**OD** : L'équivalence entre mécanique quantique standard et mécanique bohmiennne est aujourd'hui assez complètement démontrée. Il y a même des extensions relativistes très récentes qui couvrent les résultats de la théorie des champs. Le problème, c'est de savoir si la théorie de Bohm est plus intuitive ou non. La non-localité des variables cachées de cette théorie reste contre-intuitive. Mais l'avantage pour les partisans de cette théorie, c'est que les grandeurs observables spatiales ont à tout instant une valeur définie (en particulier, un chat de Schrödinger est soit mort soit vivant). Donc, tout dépend de ce qu'on a comme critère d'intuitivité. Un gros défaut des théories d'onde pilote, qui était déjà signalé par Pauli, c'est qu'il y a une grande redondance dans la représentation. En fait, il n'y a pas qu'une théorie de Bohm possible, mais il y en a plusieurs, selon qu'on se place dans l'espace des  $p$ , dans l'espace des  $q$ , etc. Il y a une infinité, en fait, de théories à la Bohm possibles. Si on applique le critère d'intuitivité selon lequel pour une théorie physique on doit avoir une correspondance la plus étroite possible entre la représentation théorique et les possibilités d'expérience, il y a une grande économie, de ce point de vue là, de l'interprétation traditionnelle de Copenhague. Cette économie est perdue dans la théorie de Bohm. En un sens, je pense qu'on n'aura jamais de réponse définitive. Car, derrière ces choix d'interprétation que tu (JMR) mentionnes, il y a des critères d'intuitivité qui sont différents, qui varient selon les personnes et suivant la philosophie générale de la connaissance qu'ils favorisent.

**HZ** : Je suis d'accord avec tout ce que tu viens de dire. Je crois que si on veut essayer de tirer une sorte de leçon à un niveau assez global, la première des choses c'est que les tentatives initiales d'arriver à faire en sorte de retrouver une interprétation qui soit compatible avec l'intuition, ce qui était en fait le but des théories à variables cachées initiales qui étaient locales, ces tentatives là, on sait d'ores et déjà qu'elles sont vouées à l'échec. Les théories à variables cachées non locales ou la mécanique quantique dans sa forme traditionnelle, elles, fonctionnent bien en termes de prédictions empiriques. En revanche, il n'est possible dans aucun des deux cas, de retrouver une interprétation du monde compatible avec l'image que nous avons du monde macroscopique. Cela, c'est déjà une première leçon. C'est une leçon qui n'est pas forcément tirée par tout le monde. Il y a encore des physiciens, qui ne s'intéressent pas forcément à ces sujets (parce qu'on peut être physicien et ne pas du tout s'intéresser aux problèmes philosophiques de la mécanique quantique), qui pensent pouvoir dire que ces problèmes-là, en fait, sont des problèmes "de fondements" mais qu'en réalité on peut sauver le réalisme d'une manière entre guillemets « naïve ». C'est-à-dire qu'on pourrait trouver des interprétations de la mécanique quantique et des théories de Bohm (qui sont souvent prises comme modèles dans ces discussions) selon lesquelles les propriétés des systèmes ont des valeurs localisées, ou des valeurs définies avant les mesures. Tout cela, on sait maintenant que ça n'est plus possible. Il y a déjà une leçon qu'on peut tirer et sur laquelle on ne reviendra pas, c'est le fait que penser que les systèmes ont des valeurs définies locales et ce avant la mesure,

ça ne marche pas. C'est contraire à l'expérience. Cela, c'est quand même une leçon qui est forte, parce qu'elle s'oppose à tout espoir de pouvoir penser que le monde est réellement tel qu'il est intuitivement perçu au niveau macroscopique. Il est vrai que dans les théories comme celle de Bohm, il est possible de considérer que les particules ont à tout moment une position déterminée, la trajectoire des particules étant déterminée par l'onde pilote. Il n'empêche que cette interprétation a quand même des limites. Comme le signale Michel Bitbol dans son intervention relatée dans le tome 2 du livre "Implications philosophiques de la science contemporaine", où il cite une expérience récente d'interférométrie sur des neutrons, les résultats expérimentaux impliquent de devoir admettre, même dans la théorie de Bohm, que la masse des neutrons n'est pas localisée à leur position mais répartie dans tout le volume de l'interféromètre. Dans ces conditions, il est clair que le gain qu'on obtient par rapport à l'intuition devient très faible, surtout si on pense de plus que ces théories doivent être non locales (à cause des inégalités de Bell) et contextuelles (à cause du théorème de Kochen-Specker). Donc, le bilan de ces théories me paraît assez négatif, compte tenu du fait que d'une part leur formalisme est bien plus complexe que celui de la mécanique quantique, qu'il y a eu des grandes difficultés, même si des progrès ont été faits, pour les étendre au niveau relativiste, et que d'autre part, le gain intuitif qu'on en retire est extrêmement faible. Par ailleurs, je pense qu'il y a dans certains cas des divergences de certaines prédictions pendant le temps de relaxation du système, entre la mécanique quantique et les théories à la Bohm. Mais pour le moment ces divergences sont encore hors de portée de l'expérience.

**OD :** C'est-à-dire que l'équivalence présuppose une harmonie préétablie dans l'état initial de l'univers entre la distribution statistique des particules et l'amplitude de probabilité des ondes. Si l'on suppose que cette harmonie n'existe pas dans des temps reculés d'ordre cosmologique, alors on peut avoir des violations de l'équivalence. Certains partisans de la théorie de Bohm cherchent des tests de ce genre. En bref, l'équivalence n'est rigoureuse que moyennant une certaine hypothèse qui n'est pas forcément satisfaite.

**EB :** Permettez moi d'insister : je ne me plaçais pas dans ici dans un cadre interprétatif. Il s'agissait comme le disait si bien Jean Michel d'essayer de vous décrire ce que nous dit l'expérience. Voilà, à partir de ça, chacun est libre de se chercher un cadre interprétatif. Comme vous le disiez très bien, ce qui a été éliminé par Bell et les expériences qui ont suivi, c'est le cadre interprétatif le plus naïf. Et ça, c'est terminé. Maintenant, il y en a peut-être d'autres. Mais, quoi qu'il arrive, il n'existe pas de cadre interprétatif simple et intuitif qui corresponde à ces expériences ahurissantes qui sont notre réalité physique.

**BdE :** Oui exactement, je pense en effet que, comme vous venez de le dire, comme Hervé Zwirn l'a souligné, c'est déjà là un acquis considérable si l'on pense à tout ce qu'on nous a enseigné. L'enseignement, je ne sais pas comment il est maintenant, mais l'enseignement que j'ai reçu et que mes filles ont reçu, c'était un enseignement qui tacitement, sans le dire, impliquait, et avec une force de persuasion considérable (on ne le démontrait pas, on ne le *disait* même jamais tant cela paraissait l'évidence même), que tout se présente finalement conformément au 'bon sens' cartésien. La physique y était, par définition, l'étude d'un réel existant hors de nous et pour le mieux connaître tel qu'il est indépendamment de nous il convenait d'utiliser sans transgression les concepts fondamentaux de position dans l'espace, de force, de mouvement, de trajectoire etc. dont tout un chacun dispose d'emblée (un peu les 'idées claires et distinctes' de Descartes), éventuellement complétés par d'autres, empruntés aux mathématiques. Qu'il allait de soi que pour l'étude en question ces concepts convenaient

et convenaient seuls. Aujourd'hui l'on sait que tel n'est pas le cas. Ou, en tout cas, on le sait avec certitude concernant le monde atomique dont vous avez parlé. Maintenant, il y a des gens très compétents qui espèrent encore que le monde macroscopique échappe à cette surprenante conclusion. Je me rappelle Jacques Merleau-Ponty, par exemple, excellent philosophe des sciences, répondant à un de mes articles et posant que le Soleil existe vraiment, tout à fait indépendamment de notre existence à nous ; ou, en tout cas, qu'il existe, indépendamment de nos possibilités de connaissance, un être naturel auquel se réfère le mot 'Soleil'. Alors, est-ce que c'est le cas, est-ce que ce n'est pas le cas ? Les personnes qui ont travaillé ou réfléchi sur la théorie de la décohérence n'ont pas toutes la même réaction à ce sujet-là. Certains estiment que la décohérence ne peut pas servir à justifier de telles théories, appelées par elles 'métaphysiques', d'un Soleil existant indépendamment de toute connaissance humaine. D'autres, au début de leurs recherches sur le sujet, ont semblé penser qu'elle le peut et que c'est ainsi qu'elle doit être interprétée. Nous aurons prochainement un exposé de Jean-Michel Raimond, sur la décohérence précisément, qui nous donnera l'occasion de discuter cette question laquelle, d'un point de vue philosophique, me paraît d'une grande importance.

**JMR** : Je ne suis pas sûr de savoir répondre à la question de savoir si le soleil existe vraiment, particulièrement en cette saison. Je me placerai d'un point de vue très « expérimentateur » de la décohérence pour manifester ce que c'est. Je ne pense pas que ce soit l'unique solution aux problèmes interprétatifs de la mécanique quantique. Elle nous dit des choses sur ce qui se passe pendant une mesure, elle ne nous dit pas tout ce qui se passe pendant une mesure. Et l'interprétation standard de la décohérence repose elle-même dans une large mesure sur le postulat de projection et sur la notion de trace partielle qui en est très techniquement une émanation directe.

**BSS** : Je voudrais vous poser la question suivante : quand on regarde la physique du XIX<sup>ème</sup> siècle, et je prendrai un exemple particulier qui est celui de Cournot, 1801-1877, rentré premier à Normale Science, etc. Pour lui se pose la question de savoir si on peut être réaliste en physique. Et alors, ce qui lui paraît déterminant, c'est le fait que la chimie de synthèse commence à se développer à partir de la fin des années 1820 et que à l'époque Marcelin Berthelot fait sa grande série de leçons au Collège de France en 1866, ou 1864, je ne me rappelle plus. Marcelin Berthelot annonce déjà qu'il peut y avoir des centaines de milliers de substances chimiques composées, que la nature n'a pas créées, mais que la chimie, dit-il, crée son objet. Alors, Cournot dit, si c'est vrai, si on a la maîtrise de la construction de substances chimiques, être réaliste cela veut dire simplement que l'on est capable de reproduire des substances naturelles et d'introduire dans la nature des substances que l'on n'a pas spontanément découvertes dans la nature. Alors, est-ce que ce mode de raisonnement est encore valable ou est-ce que la mécanique quantique crée une différence complète de situations, telle qu'on ne pourrait plus parler de réalisme au sens où l'entendait Cournot. Alors, c'est important parce que ce besoin de réalisme existe par exemple en médecine. On veut absolument être sûr que les molécules chimiques, ... si quelqu'un est diabétique, c'est pour lui très important de savoir que la molécule d'insuline qui a été créée à partir de levures génétiquement modifiées a exactement les mêmes propriétés que l'insuline humaine. Autrement dit, ce souci du réalisme existe bien pratiquement. Mais est-ce que les physiciens peuvent nous dire que c'est simplement une croyance, un confort, etc., mais est-ce que cela a également un sens scientifique ?

**EB** : Je ne suis pas très certain de pouvoir répondre à la profondeur de votre question. Je pense qu'il n'y a pas vraiment, sur ce point, de différences avec la physique du XIX<sup>ème</sup>

siècle. On prépare aujourd'hui des systèmes, même des systèmes très petits. On fabrique des nanotubes de carbone, pour prendre un exemple, il y a aujourd'hui une ingénierie au niveau moléculaire que par exemple Jean-Marie Lehn a pratiquée de manière absolument extraordinaire, mais qui continue à se faire et dans laquelle les phénomènes quantiques rentrent parfois fortement en cause et qui néanmoins ne change pas cette vision d'un monde qu'on peut construire à partir d'une combinatoire d'atomes. Notre combinatoire est devenue plus complexe parce qu'au delà de l'atome, nous avons des noyaux, au delà des noyaux nous avons des constituants qui sont les neutrons et protons qui eux-mêmes sont constitués d'objets sub-nucléaires qu'on appelle des quarks. Et c'est peut-être là qu'on rentre un peu dans une différence par rapport à ce que vous évoquez parce que ces quarks sont effectivement des composants ultimes de la matière, enfin ultimes à l'heure présente, peut-être ont-ils de nouveau une structure. Mais ils ont une grande différence, c'est-à-dire qu'on sait qu'ils existent mais on ne peut pas les produire. Donc, c'est cela peut-être pour la première fois la distance avec le réalisme simple du XIXème siècle : ils sont là, tout se passe comme s'ils étaient là, mais on sait que dans l'état actuel de choses on ne peut pas se libérer de l'attraction qui les lie à l'intérieur de nos particules, alors que dans les premiers instants de l'univers où la température était considérable, ils étaient déconfinés. Mais ils ne le sont plus et ils ne le seront plus, en tout cas si on ne revient pas à ces températures de milliards de degrés, et plus que ça encore.

**BSS** : Merci beaucoup.

**BdE** : il me semble que la question de Bertrand Saint Sernin soulève celle, importante mais délicate, de ce qu'on entend par 'réel'. Il y a la définition disons 'abstraite' qui se réfère à la notion d'existence considérée comme première et pose qu'est réel ce qui existe indépendamment de nous. C'est celle que beaucoup d'entre nous (moi y compris) avons présente à l'esprit. Il y a aussi, à l'autre extrême, celle qui est implicite dans l'expression courante : « il faut être réaliste », qui renvoie à nous puisqu'elle signifie que nous devons tenir compte des données et des phénomènes tels qu'ils se présentent et agir en conséquence. Je crois comprendre, mais peut-être me trompé-je, que Cournot adopte une définition plus operationaliste que la première, celle que je viens d'appeler 'l'abstraite'. Une définition voisine, en fait, de celle consistant à considérer qu'est réel ce sur quoi nous pouvons agir ; et vue sous cet angle cette définition de Cournot se rapproche un peu, me semble-t-il, de celle correspondant à l'expression courante du réalisme, étant donné que l'une et l'autre sont centrées sur l'action humaine.

**BSS** : Non il écarte justement les situations dans lesquelles il s'agit du bon sens et il se place pour définir le réalisme...Lui, il a une théorie générale qui est de dire les seules crises importantes de la connaissance sont les crises scientifiques. Le reste, c'est de l'opinion et ça n'a pas tellement d'importance. Il ne donne pas une définition du réalisme, il dit : le critère qui me paraît le plus solide à l'époque où je me trouve, c'est-à-dire dans les années 1860-70, c'est de dire que dans le domaine de la chimie on peut reproduire des substances existantes, en créer de nouvelles. Mais, il dit que ce n'est pas très sûr que cela marche ailleurs, ni que ce soit extensible à tout le domaine de la réalité. Voilà, et c'était un peu la raison de la question que je posais à Monsieur Brézin.

**EB** : Je crois que la limite actuelle c'est celle de la vie, d'arriver à reproduire dans un tube à essai un système qui...Craig Venter dit qu'il y est arrivé, qu'il a fabriqué pièce à pièce synthétiquement, un ADN se répliquant, ce qui est l'enjeu du Graal actuel de la physico-

chimie appliquée à la biologie. Mais, dans le monde de la physique, cette combinatoire, ce réalisme de Cournot, n'a cessé de se multiplier avec les découvertes nouvelles.

**JMR** : Je crois qu'il faut dire quand même que tu as très bien présenté Edouard, les « mystères » entre guillemets de la physique quantique. C'est vrai qu'elle est contre-intuitive, c'est vrai qu'elle est rétive à toute forme d'interprétation simple, quelle que soit l'interprétation qu'on cherche. Mais, elle est dans le même temps, extraordinairement prédictive. Jamais une théorie physique n'a été aussi prédictive. La physique quantique prend le calcul d'un paramètre exotique de l'électron qu'on appelle le  $g-2$ ,<sup>1</sup> et on sait pousser ce calcul à 12 chiffres, on sait aussi mesurer les 12 chiffres : on trouve les mêmes. Jamais une théorie physique n'a été capable de prédire une quantité physique à une précision de  $10^{-12}$  et de confirmer cela par l'expérience. La thermodynamique de Carnot, elle, était à 30% près. Donc, on est quand même dans une situation qui est, en dépit de ses difficultés d'interprétation conceptuelles, extraordinairement prédictive. Et on peut imaginer des systèmes quantiques, les combiner, les réaliser ensuite et constater qu'ils fonctionnent effectivement comme le prédit la mécanique quantique. Donc comme règles d'assemblage des briques du quantique, ça marche parfaitement et ça a un très grand pouvoir prédictif. Donc, c'est mystérieux, c'est contre-intuitif, mais ça marche très bien. C'est quand même une chose qu'il faut garder à l'esprit.

**BdE** : Mais justement, la question n'est-elle pas de savoir si la physique se réduit à un système de prédictions d'observations ou s'il y a plus dans l'enseignement de la physique que cela ? Je pense que c'est là la question, ou du moins une des principales questions, que nous voulons justement étudier dans nos réunions. Et, je dirais qu'en ce domaine je crois constater une évolution considérable dans la pensée de mes collègues physiciens. Quand j'étais jeune il allait de soi, même pour les physiciens qui pratiquaient la mécanique quantique, que, comme Edouard Brézin l'a tout à l'heure laissé entendre, il n'y avait aucun réel problème à cet égard. La physique décrivait la réalité telle qu'elle est, point final. La chose allait tellement de soi qu'il eût été vain de s'intéresser aux disputes entre Bohr et Einstein, le tout n'étant que vieilles lunes et faux problèmes... que, au reste, Bohr avait résolu depuis longtemps et « sûrement » (pensaient-ils tout bas !) d'une manière conforme à l'évidence réaliste. J'ai l'impression que cette mentalité est en train de faire place à un état d'esprit très différent voire opposé, celui que Jean-Michel Raimond vient d'exprimer, qui consiste à considérer qu'en physique les seules assertions qui comptent vraiment, parce que ce sont les seules ayant une vraie valeur de vérité, sont celles de nature purement opérationnelle. Celles du type « si l'on fait ceci on verra cela » ainsi que les règles de calcul très générales (les axiomes de la mécanique quantique ne sont rien d'autre) d'où se déduisent de telles assertions. Mais, d'une part cette mentalité ne s'est pas, ou pas encore, généralisée et il s'en faut, et d'autre part nous sommes tous un peu schizophrènes : nous pensons ainsi durant nos heures de travail ou de réflexion sur la technique de ce travail mais avec cependant, chez beaucoup, un fort sentiment d'incomplétude, lié à l'idée que la pensée humaine n'est pas la seule chose existante. Enfin nous devons nous dire que passer d'un extrême à l'autre est rarement la bonne réponse. Tout n'est sans doute pas aussi simple. Aussi continuons-nous à réfléchir.

**ASO** : Je voudrais juste revenir sur un terme qui est apparu à plusieurs reprises et dont l'ambiguïté a été soulignée par Olivier Darrigol qui est le terme d'intuition justement. Je crois que la question qui se pose et qui est fondamentale, c'est de savoir si l'intuition est une

---

<sup>1</sup> Il s'agit de la différence entre le rapport gyromagnétique réel de l'électron et la valeur théorique 2 donnée par l'équation de Dirac pour l'électron libre.

donnée immédiate, une donnée inattaquable, première, de notre représentation du monde ou si l'on peut construire l'intuition. Ce qui voudrait dire qu'on pourrait parler d'intuitions au pluriel, par exemple. Je voudrais juste donner deux petits exemples qui est premièrement ce qui se passe en théorie des ensembles, et deuxièmement ce qui se passe en relativité restreinte. On voit très bien quand on enseigne la théorie des ensembles aux étudiants. Qu'est-ce qu'on fait en théorie des ensembles ? On présente les constructions cantorienne. Que montre Cantor ? Qu'il existe un échelle d'infinis et qu'il existe des infinis plus grands que d'autres. A partir de là, deux choix s'offrent à l'individu qui reçoit cet enseignement, cette information, qui est premièrement de refuser cette construction en disant il n'est pas possible qu'il y ait des infinis plus grands que d'autres, ou, autre option, qui est de réaliser que notre intuition première, naïve de ce que c'est qu'un ensemble, naïve de ce que c'est que l'infini est à revoir, au regard de cette construction. Me semble-t-il, il se passe quelque chose de relativement analogue en relativité restreinte avec la relativité de la simultanéité. La relativité restreinte peut apparaître contre-intuitive, parce que l'on croit au caractère absolu de la simultanéité. Et quand on finit par mettre les mains dans le cambouis, par mettre les mains à la pâte, on se rend compte que, là encore, c'est notre intuition première, à savoir la croyance au caractère absolu de la simultanéité, qui ne tient pas. Autrement dit, souvent notre intuition ordinaire repose sur un défaut d'analyse, en quelque sorte. Et j'aimerais savoir dans quelle mesure il est possible d'avoir quelque chose d'analogue en mécanique quantique, dans quelle mesure il est possible de construire ce qu'on pourrait appeler une intuition quantique du monde.

**EB :** J'ai du mal à répondre. Il est clair qu'on s'habitue progressivement. La relativité, la première fois qu'on en entend parler, paraît absolument ahurissante, on a eu un mal fou à l'admettre. A partir du moment où l'on sait qu'il n'existe qu'une vitesse finie de transmission de l'information, on comprend immédiatement que la simultanéité est en cause. A partir du moment où on ne peut plus dépasser une certaine vitesse de transmission de l'information, on voit bien que deux observateurs en mouvement n'auront pas la même définition de la simultanéité. Donc, on finit par se faire une vision intuitive dans laquelle on intègre le fait qu'il existe une vitesse finie pour la lumière. En mécanique quantique, c'est vrai que les praticiens, les gens qui font de la chimie quantique tous les jours ont une vision très intuitive de ces orbitales, de la façon dont ils les combinent, de la façon dont elles vont lier ou ne pas lier tel système dans lequel tel système moléculaire va être aussi. Donc, ils se forment une intuition plus élargie de la mécanique quantique, c'est vrai. Là où les choses deviennent plus complexes, c'est vraiment dans ces situations EPR. Jusqu'aux situations EPR, on peut modifier notre intuition de façon à intégrer la mécanique quantique. Pour l'instant, ces situations d'intrications pour les systèmes sont quand même très difficiles à intégrer intuitivement. Peut-être que des gens comme Jean-Michel Raimond qui sont plongés tous les jours dans des choses intriquées...

**JMR :** A force d'être plongé dans l'intrication tous les jours, d'en faire 10h par jour pendant 35 ans, on finit forcément par adapter le fonctionnement de ses circuits neuronaux à ce genre de situations. On reste à peu près normal par ailleurs. Donc, on peut développer une intuition quantique, qui permet de dire sans calcul si on faisait ça, ça ferait ça, et alors l'état du système serait ça. Et j'ai le sentiment que je commence un peu à y arriver, très modestement. Et il y en a d'autres qui y arrivent beaucoup mieux que moi qui sont ces gens qui manipulent effectivement intrication et non localité. Les gens qui font de l'informatique quantique par exemple, ceux qui travaillent sur les algorithmes quantiques pour ordinateurs quantiques, pur fantasme théorique pour l'instant, ces gens là développent une véritable intuition de comment on peut faire un calcul en maniant des états quantiques. Le problème de cette intuition là, c'est qu'elle est facilement 'misleading', enfin on peut facilement se laisser abuser par elle, en ce

sens qu'elle est fragile parce que c'est une intuition construite. Ce n'est pas l'intuition du gros bon sens qui dit : si je lâche le caillou, il tombe, qui elle est vraiment ancrée dans notre expérience quotidienne. Ce n'est pas une intuition ancrée dans l'expérience quotidienne et donc c'est une intuition plus fragile et plus susceptible d'erreur.

**OD :** A ce sujet je voudrais faire remarquer—c'est un peu amusant—que l'article de Heisenberg sur les relations d'incertitude s'intitule: « sur le contenu intuitif de la mécanique quantique ». Donc, il espérait par ses arguments, avec ses expériences de pensée, établir une nouvelle intuition. En gros, il s'agissait de montrer que les possibilités concrètes qu'on a de manipuler des dispositifs de mesure correspondent exactement aux possibilités de définition formelles à l'intérieur de la théorie. Donc, il y a une sorte d'harmonie en mécanique quantique, aussi bizarre qu'elle soit, entre possibilités de mesure et dispersion théorique des grandeurs. C'est là une chose assez remarquable. Evidemment ça ne résout pas tous les problèmes comme vous l'avez signalé aujourd'hui. Il y a le problème essentiel de la mesure, de la non localité, etc. Il est remarquable que des physiciens comme Jean Michel puissent se faire, dans le quotidien de leur laboratoire, une nouvelle intuition qui intègre toutes les incongruités quantiques. Mais je suppose que tu (JMR) dois quand même te poser la question de la compatibilité de cette intuition avec la physique macroscopique. La mécanique quantique, appliquée à l'interaction entre un objet quantique et un dispositif de mesure idéal, ne conduit en général pas à une valeur définie du résultat de mesure. La décohérence vise à lever cette difficulté. Mais - c'est un point qui a été souligné par Bernard d'Espagnat à l'encontre de certaines interprétations naïves de ladite décohérence - il reste toujours cette question ouverte: pourquoi est-ce qu'au bout du compte un système macroscopique est toujours vu par nous dans *un* état bien défini ? C'est contraire à la prédiction du formalisme, même dans la théorie de la décohérence. La théorie de Bohm permet de répondre à cette question, mais d'une manière que l'on peut contester pour les raisons philosophiques et pratiques susmentionnées. Quant à la théorie d'Everett, mentionnée par Lena Soler, elle aborde ce problème d'une façon qui est très extraordinaire par rapport à nos habitudes de pensée. Là, il faut vraiment basculer dans une nouvelle, une très nouvelle intuition. Mais il y a des partisans de ça. Par exemple, Thibault Damour est un fervent adepte de cette théorie. Donc il y a des gens très sérieux, il y a des cosmologues qui s'intéressent à cette théorie là.

**JMR :** Quand je disais intuition du monde quantique, c'est clairement une intuition de ce qui se passe dans le cadre de la physique quantique *stricto sensu*. Il reste impossible je pense d'avoir une intuition viscérale de ce que c'est qu'une particule localisée en deux endroits à la fois. Cela je pense que c'est...Mais l'intuition de ce qu'on obtiendrait si on jonglait avec le formalisme confirmée ensuite par l'application dudit formalisme, cela on peut la développer.

**HZ :** Sur cette notion d'intuition. Pourquoi est-ce qu'on se pose la question de l'importance de l'intuition ? Si on revient au problème du réalisme, que vous avez évoqué au début, en fait l'intuition est importante parce que c'est par rapport à elle qu'on définit ce qu'est le monde macroscopique, donc le réalisme. La définition de ce qu'on appelle "réalisme" doit être précisée : on peut le définir comme le fait qu'il existe quelque chose qui est indépendant des observateurs qui sont là pour l'observer. C'est le problème du soleil : le soleil existe-t-il ou la lune brille-t-elle si personne n'est là pour l'observer ? Si l'on prend ça comme définition du réalisme, alors l'intuition est importante parce que la physique quantique va à l'encontre de notre intuition macroscopique qui est construite au fur et à mesure qu'on grandit, de l'enfant à l'adulte à travers notre expérience du monde macroscopique qui nous pousse à croire qu'effectivement, indépendamment de nous, le monde existe en soi et que finalement nous sommes des observateurs neutres. Ce que montre la physique quantique c'est que cette

position là, n'est plus possible. On ne peut plus penser cela aujourd'hui. Je crois que Bernard d'Espagnat l'a clairement montré dans beaucoup de ses écrits, l'idée que l'on puisse décrire la physique quantique en faisant totalement abstraction de l'observateur ne marche pas. On peut le faire en physique classique, il n'y a pas de problème. On peut avoir une description objective de la physique classique et donc on peut s'abstraire de la notion d'observateur, donc on peut être réaliste. En revanche, la physique quantique ne nous permet pas de faire ça et l'observateur doit nécessairement à un moment donné être mentionné. Il y a eu des espoirs avec la décohérence de pouvoir penser que finalement la référence à un observateur n'était pas indispensable, mais en réalité une analyse précise de la manière dont fonctionne la décohérence, et j'espère qu'on aura l'occasion d'en débattre, montre que, comme le disait Olivier, ça ne marche pas ; c'est-à-dire qu'à l'étape ultime de la décohérence, à travers cette opération de trace partielle qui permet de s'affranchir des degrés d'observation de l'observateur et d'aboutir à un état déterminé, l'observateur est là et bien là ! Sinon tout reste superposé. Donc, le problème du réalisme tel qu'on le posait tout à l'heure n'est pas réglé par l'intuition des expérimentateurs. Je suis persuadé que les expérimentateurs qui baignent quotidiennement dans les expériences qu'ils réalisent, peuvent avoir une intuition du monde quantique, comme on peut acquérir une intuition à propos d'un jeu totalement arbitraire à force de le pratiquer. Ce jeu suit des règles et on ne cherche pas forcément à les comprendre mais à force de les pratiquer on finit par savoir à l'avance ce qu'il va se passer. Mais cette intuition là, n'est pas pour autant suffisante pour nous permettre de ramener la description du monde à une description réaliste parce que pour cela il faudrait que cette intuition se ramène à l'intuition macroscopique et qu'on puisse s'affranchir de l'observateur. Et cela, il semblerait en tout cas, et se sera l'objet de nos débats, qu'on ne puisse plus le faire aujourd'hui. La position réaliste traditionnelle –il y en a beaucoup de descriptions différentes- semble ne plus fonctionner.

**BSS** : De toute façon, ce n'est pas celle de Cournot.

**HZ** : Ce n'est pas celle de Cournot, par ailleurs.

**OR** : Juste une petite remarque. Je suis frappé par une phrase de Poincaré qui dit : « pour un être parfaitement immobile, il n'y aurait pas de géométrie. » Cela veut dire que l'espace dans lequel nous évoluons n'est pas un espace qui est indépendant de nous, mais un espace construit par nos actions. Il me semble qu'il y a beaucoup de choses paradoxales dans la physique quantique qui perdent ce caractère paradoxal à partir du moment où on voit la science non pas comme la science du monde tel qu'il est, mais de la façon dont nous interagissons avec lui. De ce point de vue, la théorie devient parfaitement cohérente. La question qui se pose au-delà, c'est de savoir dans quelle mesure on peut identifier l'espace de nos actions avec un espace objectif, indépendant d'elles. Et deuxièmement, dans quelle mesure nous pouvons produire une théorie unitaire qui engloberait toutes nos possibilités d'interaction avec le monde. Paul Veyne a bien décrit dans son livre *Les Grecs croyaient-ils à leurs mythes ?* qu'au cours d'une même journée, nous sautons sans cesse d'un système de vérité à un autre selon le contexte dans lequel nous sommes impliqués. Lorsque nous sommes dans un laboratoire, ou avec nos proches, etc., nous ne nous mouvons pas à l'intérieur des mêmes systèmes de vérité. Ce dont aimerait bien disposer la physique, c'est qu'au moins, en physique, nous puissions disposer d'un système de vérité unitaire. Et il n'est pas du tout clair qu'on puisse y parvenir. Si j'essaie de m'exprimer par analogie : en mathématiques, les variétés différentielles sont des espaces topologiques qui ont la propriété de pouvoir être mis localement en homéomorphisme avec des ouverts de  $\mathbf{R}^n$ . De ce point de vue,  $\mathbf{R}^n$  est évidemment une variété, puisque l'application identité le met en homéomorphisme avec lui-

même. On pourrait dire que  $\mathbf{R}^n$  n'est qu'un cas particulier de ces nouveaux espaces plus généraux que sont les variétés différentielles ; à ceci près qu'on a besoin de  $\mathbf{R}^n$  pour définir les variétés. Entre la mécanique classique et la physique quantique, il me semble qu'il y a quelque chose de cet ordre-là, une relation d'enchevêtrement d'une autre nature que ce qui se passe entre la relativité et la mécanique classique. Au sein de la théorie relativiste, on retrouve la mécanique classique en faisant tendre  $c$  vers l'infini. Dans le cas de la physique quantique, la situation est plus compliquée, dans la mesure où on ne peut simplement considérer la mécanique classique comme une limite de la mécanique quantique. En effet, il faut nécessairement qu'une réalité classique existe pour qu'on puisse même formuler la physique quantique. À partir de là, se pose la question de savoir si on peut concevoir de façon unitaire cet enchevêtrement entre une physique classique et une physique quantique.

**EB** : Nous aurions tous souhaité qu'il en fût ainsi. En particulier, c'est ce que j'essayais de dire, une distribution quantique conjointe de l'appareil de mesure et du système : l'espoir, naïf peut-être, était que ceci permette de s'affranchir de ces choses trop compliquées.

**OR** : Justement, l'expérience montre que ces choses naïves, ça ne peut pas marcher.

**EB** : En tout cas, ça ne marche pas de manière simple. Cela dit, on applique la mécanique quantique tous les jours, à des situations comme les modèles inflationnistes du début de l'univers qui expliquent les fluctuations du rayonnement cosmologique, qui est observé maintenant en très grand détail. On l'applique à des tas de situations où il n'y avait pas le moindre observateur, avec une fiabilité et une confiance dans sa façon de l'appliquer totales. C'est vrai que les situations dans lesquelles on s'interroge aujourd'hui sont très limitées. J'en vois deux : il y a d'abord, ces situations style EPR, où je trouve qu'on a un mal fou à comprendre ce qui se passe dans quelque interprétation qu'on se fasse. Et puis, il y a qu'à l'échelle de la longueur de Planck, il n'existe pas de théorie quantique convaincante pour le moment et qu'il est fort possible que ceci implique des bouleversements très profonds par rapport à la mécanique quantique telle que nous la connaissons. Peut-être que la mécanique quantique que nous connaissons est comme une thermodynamique par rapport à une physique corpusculaire statistique sous-jacente. La physique statistique, ça marche très bien, mais il y a quelque chose d'autre qui permet de comprendre d'où elle sort. Peut-être que c'est cela la vérité quantique. Tant qu'on n'a pas de théorie quantique de la gravitation marchant y compris dans ces situations, ces problèmes de trous noirs, qui ont eux-mêmes des propriétés d'évaporation quantique, on ne peut pas dire : « ça y est nous avons une théorie définitive ! », pour peu que ceci ait un sens. Je ne sais pas s'il existe des théories définitives, on rentre dans la philosophie vraie, mais pour l'instant nous n'y sommes pas.

**JMR** : Il n'y a aucune expérience à ces échelles là, simplement même concevable, sauf peut-être, à l'échelle cosmologique un jour.

**OR** : L'idée que je voulais essayer de formuler à travers l'analogie, qui vaut ce qu'elle vaut, avec les variétés différentielles, c'était que précisément, la physique devait peut-être admettre le fait qu'il n'y ait pas de théorie englobante, et que selon l'échelle à laquelle on se place, selon le type de phénomènes qu'on étudie, on devrait à chaque fois s'en remettre à un certain formalisme en accord avec les possibilités d'expérience dont on dispose vis-à-vis du type de réalité étudiée.

**EB** : Tout est allé dans l'autre sens, quand même. Si vous regardez l'histoire de la physique, rien ne permettait de penser qu'on obtiendrait une vision unifiée de l'électricité et du

magnétisme, triomphe de Maxwell. Rien ne permettait de le comprendre, et d'ailleurs Maxwell ne s'est pas attelé à dire je vais faire une théorie unifiée. Rien ne permettait de penser qu'on aurait un jour, — et Monsieur d'Espagnat a travaillé beaucoup sur la théorie des interactions faibles —, une théorie unifiée de l'électromagnétisme et des interactions faibles. Et ce n'est pas sorti par une volonté d'unification, c'est sorti de la compréhension quantique elle-même. Autrement dit, tout est allé dans le sens d'une unification totale de tous les concepts que nous avons, sans que la démarche soit partie d'une volonté d'unifier ces forces si différentes. Mais tant qu'il n'y aura pas de formalisme qui aura démontré expérimentalement sa capacité à concilier la gravitation d'Einstein et la mécanique quantique, le problème restera ouvert.

**JP** : J'aimerais faire une remarque en repartant de ce que vous disiez : « on ne peut pas avoir l'intuition d'une particule qui est à deux endroits à la fois ». Cette crise de l'intuition a été très bien formulée par certains philosophes au début du XXème siècle. Je pense par exemple à un texte de Husserl, qui était assez loin de la physique, où il dit que le problème fondamental que pose la mécanique quantique, est que la localisation spatiale n'y est plus un principe d'individuation, alors qu'elle l'est pour nous dans notre intuition qui vient du monde macroscopique. Il s'agit là véritablement de quelque chose de critique. Je ne veux pas revenir à Kant qui est l'un de mes maîtres en philosophie, mais l'intuition dont nous parlons est essentiellement l'intuition spatio-temporelle et il y a conflit entre la non commutativité au sens de la mécanique quantique et l'intuition spatiale comme cadre géométrique. Nous rencontrons là un problème théorique fondamental qui est resté ouvert extrêmement longtemps et qui commence à peine à être surmonté aujourd'hui. Dans toute l'histoire de la mécanique quantique, jusqu'aux théories relativement récentes, il y a eu ce conflit entre le cadre géométrique de l'espace-temps et d'autre part les descriptions en termes d'algèbres non commutatives d'opérateurs sur des espaces de Hilbert, etc.

Personnellement, j'apprécie beaucoup la pensée d'Alain Connes, qui a pris le problème à bras-le-corps et qui a dit : la non commutativité, il faut la faire passer à un niveau plus fondamental, il faut la descendre, en quelque sorte, de la non commutativité des observables à une intuition géométrique qui est entièrement à repenser à partir de l'a priori qu'est la non commutativité. On part de là, et on va reconstruire l'intuition spatiale. Cette idée qu'il faut élaborer une géométrie spectrale à partir par exemple, des expériences de base que vous avez rappelées sur les raies spectrales qui sont complètement incompatibles non seulement avec la physique classique mais avec le cadre géométrique de la physique classique, cette idée de reconstruire la géométrie elle-même est, je crois, un pas qui manquait jusqu'ici et qui est très riche. Alain Connes l'a fait mais il y a d'autres possibilités, Witten par exemple. J'espère que, même si c'est technique, et sans trop rentrer dans les formules, on aura la possibilité de parler de la façon dont certains physiciens mathématiciens, comme Carlo Rovelli par exemple qui travaille beaucoup là-dessus, essayent de transformer les a priori les plus fondamentaux de notre intuition à partir des bases de la mécanique quantique, du spectral et de la non commutativité.

**BdE** : Si quelqu'un arrive à faire ça en court-circuitant les parties trop techniques, ou trouve un moyen de les faire admettre, alors oui, bien sûr. Mais c'est un travail difficile.

**JP** : Oui, géométriser la non commutativité, c'est difficile.

**EB** : C'est vrai que nous sommes dans un moment de crise, de difficulté véritable. Je crois qu'Alain Connes est parti, a été très inspiré, il le dit lui-même, par la mécanique des matrices d'Heisenberg. Il est parti de là. Il introduit une géométrie non commutative, qui est une vision

de l'espace-temps a priori. Les physiciens ont suivi une démarche différente. Et dans la vision actuelle d'une partie de la physique, en particulier de la théorie des cordes, l'espace et le temps, dans les visions qu'on appelle « branes » aujourd'hui, apparaissent comme des variables non commutatives. Le temps et l'espace, comme disent aujourd'hui ces physiciens, sont des variables émergentes. Ce sont des concepts émergents, ce ne sont pas des concepts a priori dans lesquels on place les objets comme dans la vision classique. L'espace n'est plus indéfiniment divisible. Les concepts d'espace et de temps, d'infini, pour revenir à ce que vous disiez, sont complètement différents dans cette vision des choses. Je crois qu'il y a encore au bout du chemin, qui est loin d'être terminé, des bouleversements à attendre de notre vision, je n'ose pas dire intuition, de ce que peuvent être l'espace, le temps et de la physique qui s'y déroule qui est encore en profonde évolution ou débat. Cela prendra peut-être encore beaucoup de temps, mais il y a beaucoup de gens qui y travaillent.

**JP** : Je crois que c'est un pas philosophique vraiment essentiel.

**BdE** : Une dernière question.

**JPB** : Une question peut-être un peu prématurée, mais j'aimerais vous la poser. Vous savez sans doute que des gens de l'intelligence artificielle estiment aujourd'hui que si notre cerveau est ce qu'il est parce qu'il a suivi une longue évolution, pendant des millions d'années, il ne peut pas comprendre un monde qui lui échappe. Mais si on lui adjoignait des prothèses issues de l'intelligence artificielle, plus exactement si on simulait un cerveau plus ouvert et qu'on l'amenait à interagir avec des expériences de physique qu'il ne comprend pas, on s'apercevrait que cet automate intelligent pourrait, subitement, on ne l'aurait pas prévu pour ça, apporter des réponses. Ce serait évidemment tout à fait aléatoire, mais ce serait une voie. Alors je vous poserai plus tard la question de savoir si vous pensez que notre cognition est ou n'est pas limitée avec les capacités de notre neurologie aujourd'hui, et si notre neurologie plus tard, interagissant avec toute une série d'organismes artificiels pourrait se donner du monde une vision radicalement différente, où on verrait à ce moment là s'expliquer les mystères de la mécanique quantique.

**BdE** : C'est une bonne question, même s'il n'est pas sûr que nous saurons y répondre.

**JMR** : Sans prothèse...

[**BdE** : Avant de nous séparer, quelques questions pratiques...]

FIN DE LA CONFERENCE.