

Collège de physique et de philosophie
Séance du 3 octobre 2011

Bernard d’Espagnat. Notre groupe de réflexion sur les apports de la physique contemporaine à la théorie de la connaissance entame sa deuxième année d’existence et j’ai le plaisir de saluer la présence aujourd’hui parmi nous d’Alain Aspect et de Michel Le Bellac, venus écouter Franck Laloë afin d’en savoir plus encore relativement à la théorie de Louis de Broglie et David Bohm. Il va sans dire que nous sommes très heureux de cette présence et serons ravis de la voir se renouveler.

Franck Laloë a gentiment accepté de nous éclairer sur cette vieille théorie, qui a la vertu rare d’être ontologiquement interprétable et qui, malgré cela, ne séduit pas grand monde, il faut bien le dire, parmi nous – sans que nous sachions toujours précisément pourquoi. L’exposé d’aujourd’hui et la discussion qui suivra nous permettront peut-être d’avancer un peu dans la résolution de cette énigme. Cher Franck, vous avez la parole.

LA THÉORIE DE L’ONDE PILOTE DE LOUIS DE BROGLIE ET DAVID BOHM

Exposé de Franck Laloë

Franck Laloë. Merci beaucoup. Je suis ravi de prendre la parole et de me faire le défenseur de la théorie de Broglie Bohm (dBB) pendant la durée de cet exposé.

Après l’introduction générale, je voudrais rappeler le principe général de cette théorie en partie 1. Vous la connaissez probablement tous, mais il n’est pas mauvais de commencer par un petit rappel. Je parlerai ensuite en partie 2 des trajectoires bohmiennes, qui présentent quelques particularités curieuses et intéressantes. Le point 3 portera sur la mesure en théorie de Bohm, qui me semble un des points forts et particulièrement intéressant de la théorie dBB. En partie 4, je parlerai très rapidement de la théorie des champs. Jusque là, je me ferai l’avocat de la théorie dBB, en essayant de vous convaincre de mon mieux qu’elle rencontre beaucoup de succès et qu’elle présente de nombreux avantages. A partir du point 5, j’apporterai des nuances à ce point de vue et j’expliquerai, pour finir, pourquoi, à mon sens, elle ne fait pas autant que ce qu’on aurait pu espérer.

Je vous propose quelques références, en précisant que j’ai été un peu embarrassé concernant celles de de Broglie ; il a beaucoup publié de petites notes au contenu extrêmement court, où il explique ses idées sur tel ou tel phénomène. Il n’existe pas beaucoup de textes complets dans lequel il donne une vue générale sur sa théorie. Je propose cependant : L. De Broglie, « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement », J. Physique et le Radium, série VI, tome VIII, 225 (1927); « Tentative d’interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire », Gauthier Villars (1956).

Je citerai ensuite les deux articles de Bohm, que beaucoup d’entre vous connaissez : D. Bohm, « *A suggested interpretation of quantum mechanics in terms of ‘hidden’ variables* », I and II, Phys. Rev. 85, 166 et 180 (1952).

Je recommande vivement un ouvrage relativement récent, en particulier pour ses illustrations : P. R. Holland; « *The quantum theory of motion* », Cambridge University Press (1993).

Il existe également un très grand nombre d'articles sur la théorie dBB, en particulier dans ArXiv, dont certains sont intéressants, d'autres moins, d'autres faux. Parmi les bons auteurs, S. Goldstein notamment, l'un des grands chantres de cette théorie qui a écrit de nombreux articles.

Au cours de l'exposé je parlerai d'un article relativement connu d'Englert, Scully, Süssmann et Walter : « *Surrealistic Bohm trajectories* », Z. Naturforschung 47a, 1175 (1992). C'est un article critique sur la théorie dBB, qui ne remplit pas à mon avis son objectif critique, mais qui reste très intéressant à mon sens.

La mécanique quantique pose des problèmes d'interprétation difficiles – sinon, notre groupe de réflexion n'existerait pas. Nous sommes d'accord là-dessus ! L'approche de la théorie dBB n'est pas du tout de chercher à les éviter. Au contraire, elle vise vraiment à « prendre le taureau par les cornes ». Elle parle vraiment des « choses qui existent » et ne suit aucune stratégie d'évitement ou d'interdiction à la Bohr. C'est vraiment, de ce point de vue, une approche extrêmement directe et intéressante.

Comme l'a très bien dit Bernard d'Espagnat, il est souvent de bon ton de rejeter la théorie dBB, parce qu'on la considère vieille, dépassée, certains diront inesthétique, réactionnaire... On entend beaucoup de qualificatifs. Cela dit, en fait, peu de physiciens se sont donné le mal de vraiment l'étudier. Ce qui me frappe, c'est que dans la littérature on trouve un nombre impressionnant de réfutations de la théorie dBB qui illustrent surtout l'incompréhension que leurs auteurs ont de cette théorie, plus qu'une véritable réfutation. Typiquement, les auteurs utilisent une espèce de mélange à leur idée de la théorie dBB et de la mécanique quantique standard, et arrivent à l'idée que « cela ne colle pas ». Nous y reviendrons, et nous verrons que la critique ne s'applique généralement pas à la véritable théorie dBB, mais à une version hybride inventée pour l'occasion par l'auteur.

Beaucoup d'entre vous connaissez et avez déjà utilisé la citation de Feynman : « *We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot make the mystery go away by explaining how it works.* ». Ce faisant, Feynman décrit le phénomène d'interférence particule par particule, et considère que c'est vraiment le grand mystère de la mécanique quantique, que personne ne peut expliquer. Les bohmiens ou les néo-bohmiens en sourient, puisque pour eux, la situation est presque triviale et ne présente aucun grand mystère particulier.

Alain Aspect. Me permettez-vous d'apporter un commentaire ?

Franck Laloë. S'il vous plaît.

Alain Aspect. Vingt ans plus tard, Feynman a affirmé qu'il existait un deuxième mystère dans la physique quantique, qui s'appelle l'intrication.

Franck Laloë. Et qui est peut-être plus profond que le premier, d'ailleurs.

Alain Aspect. La citation que vous rappeliez est tirée d'un article rédigé à la fin des années 50. Vingt ans plus tard, dans l'article de 1982 qui est considéré comme l'article fondateur

de l'information quantique, Feynman écrit explicitement qu'il existe un deuxième mystère qu'il a essayé toute sa vie de résoudre mais qui demeure : l'intrication. Quand j'ai commencé des expériences sur les inégalités de Bell, tout le monde me disait « c'est la dualité en deux particules, on connaît, on sait que c'est le problème fondamental de la mécanique quantique ». Grâce à vous, Franck, en particulier, j'avais compris que c'était d'une nature différente, c'est-à-dire que l'intrication était la dualité en deux particules, si j'ose dire, pour deux particules. J'apporte simplement ce commentaire. Feynman a certes écrit ce que vous venez de rappeler, « tout le mystère est là », mais ensuite, il a quand même accepté de « mettre de l'eau dans son vin », si j'ose dire.

Edouard Brézin. Si je prends la théorie sur la liaison à un électron, c'est l'intrication électronique qui crée la liaison entre les deux atomes. C'est quand même bien une intrication à un électron, non ?

Alain Aspect. Non. La meilleure preuve, comme nous le verrons dans l'exposé de Franck Laloë, est que la théorie dBB nous permet de donner une interprétation locale de phénomènes à une particule, alors que si on cherche à donner des interprétations de phénomènes à deux particules, il n'y a plus d'interprétation locale. Nous pouvons en rediscuter.

Bernard d'Espagnat. La théorie de Bohm n'a jamais prétendue être locale.

Alain Aspect. Non, mais cela montre bien la nature différente des problèmes, me semble-t-il.

Suite de l'exposé

Franck Laloë. Ainsi que je l'ai indiqué à Bernard d'Espagnat, je ne suis pas particulièrement féru de la question, en particulier de la théorie de la « double solution ». Louis de Broglie l'a introduite juste après sa thèse. L'idée générale est que la fonction d'onde ne représente pas directement la particule, mais un champ qui guide son mouvement.

Dans un premier temps, la particule elle-même était représentée par une autre onde qui, elle, est une onde localisée. C'est une deuxième solution de la même équation. De Broglie considère que les deux ondes doivent se mettre en phase. L'onde de Schrödinger se propage selon l'équation linéaire que nous connaissons tous et la deuxième onde, l'onde singulière, qui représente la particule est une petite horloge qui oscille aussi – et le mouvement de ces deux ondes se fait de telle sorte que les phases des deux ondes se synchronisent.

Je n'ai personnellement pas compris si c'est une idée générale qui est proposée, ou si elle permet véritablement d'écrire un formalisme mathématique et des équations précises. Je ne comprends pas très bien comment l'équation de Schrödinger pourrait admettre des solutions localisées supplémentaires (la double solution), de sorte que j'imagine qu'il faut changer l'équation – ou alors le type de solution (une distribution ?). Toujours est-il que de Broglie devait être un peu mal à l'aise lui aussi, au moins en 1927 lorsqu'il a été invité à parler de sa théorie au fameux congrès Solvay. A cause de la difficulté mathématique de la théorie de la double solution, il a présenté une autre version « tronquée » (je ne fais que répéter ce qu'il a écrit- sinon je n'oserais pas le dire !)

Il a alors considéré qu'il valait mieux présenter une théorie plus simple, en remplaçant la deuxième onde par une position à une particule. C'est là qu'il a inventé la théorie de l'onde pilote, qui est celle qu'il a présentée au congrès Solvay avec un succès modéré, comme vous le savez. Il semble même que personne n'ait été convaincu. Rétrospectivement, ce qui est amusant,

c'est que constater que c'est souvent pour les mauvaises raisons. Quand Pauli avait vivement attaqué la théorie de de Broglie, il avait avancé des arguments concernant les collisions inélastiques dont la théorie de l'onde pilote serait incapable de rendre compte. Si on y réfléchit maintenant, ces arguments ne tenaient pas. Mais, à l'époque, l'équivalence entre les prédictions des divers formalismes et leurs relations n'était pas bien claire !

Puis, en 1952, Bohm (qui ne connaissait pas le travail de de Broglie) a proposé une théorie très proche de la deuxième version de la théorie de l'onde pilote. J'ai appris tout récemment que Bohm était un physicien américain. J'ai longtemps cru qu'il était britannique et même londonien. Il a fait sa thèse à Berkeley, avec Oppenheimer comme patron. Extrêmement brillant, il avait fait des calculs sur les collisions de protons et de deutérons. Mais, à l'époque, on mettait au point la bombe nucléaire. Son travail a alors été immédiatement classifié. Du fait de ses opinions politiques, il n'avait pas accès aux documents classifiés – son travail de thèse s'est donc immédiatement trouvé en dehors de sa portée. On lui a même interdit de rédiger son mémoire de thèse. Ensuite, ce jeune physicien a connu des tribulations assez compliquées. Il a été courageux du temps du maccarthysme, en refusant de dénoncer des collègues, ce qui lui a valu de perdre son poste à Princeton. Il est alors parti en Amérique du Sud, avant de s'établir en Angleterre où il a fini sa carrière.

Alain Aspect. Puis-je vous rapporter un témoignage de presque première main ? Il a été professeur à Rio de Janeiro. Moses Nussenzweig, que nous connaissons tous, raconte volontiers que lorsqu'il a suivi les cours de Bohm, ce dernier avait déjà changé de position sur la mécanique quantique par rapport à son livre, qui est un livre standard de mécanique quantique. Nussenzweig raconte que, c'était tout à fait étonnant, en parlant de son livre Bohm disait « dans son livre, il dit que... », « il » étant lui-même, c'est-à-dire le Bohm de la mécanique quantique standard. Il avait clairement changé de point de vue par rapport à celui qui avait écrit le livre, qui était lui-même. Cette histoire est tout à fait intéressante !

Michel Bitbol. Il a même changé d'avis une troisième fois, en s'inscrivant en faux contre sa théorie de 1952. Il a proposé, à la place, une théorie holistique dans laquelle les trajectoires de particules ne sont que des apparences.

Alain Aspect. En tout cas, il est intéressant d'avoir au moins un témoignage direct des cours de Bohm.

Suite de l'exposé

1 Principes généraux

Franck Laloë. Oui, les travaux décrits dans ses derniers livres sont clairement philosophiques. Mais revenons à la physique plus standard et revenons aux principes généraux de la théorie dBB.

La dualité de la mécanique quantique standard est remplacée par une coexistence : onde et particule coexistent toujours (il n'existe pas de particule sans son onde associée ou le contraire). De plus, ces deux objets – car ce sont des objets considérés comme réels –, interagissent.

Pour une particule unique, l'évolution de la position R , ponctuelle, est donnée par une formule que Bohm appelle « formule de guidage » et que vous connaissez tous, qui exprime la variation temporelle de la position :

$$\frac{d}{dt}\mathbf{R} = \frac{1}{m|\Psi(\mathbf{R}, t)|^2} \operatorname{Re} \left[\frac{\hbar}{i} \Psi^*(\mathbf{R}, t) \nabla \Psi(\mathbf{R}, t) \right] = \frac{\hbar}{m} \nabla S(\mathbf{R}, t)$$

Alain Aspect. S, c'est l'action ?

Franck Laloë. Non, c'est la phase de la fonction d'onde. Psi est la fonction d'onde, m la masse de la particule.

Edouard Brézin. Cela signifie que si la fonction d'onde est réelle, la particule est immobile.

Franck Laloë. Oui. La fonction d'onde, elle, évolue selon l'équation de Schrödinger habituelle.

Pour N particules, la généralisation est simple, à ceci près qu'il faut raisonner dans l'espace des configurations à 3N dimensions. On écrit alors une formule qui généralise immédiatement celle que nous venons d'écrire, ce qui a l'air très simple mais qui, comme l'a déjà dit Alain Aspect, peut conduire à des résultats intéressants en termes de localité.

Quelques petites remarques au passage. D'abord, la formule donne directement la vitesse en fonction d'un champ extérieur, ce qui est un peu surprenant pour un physicien. En effet, depuis Galilée, nous sommes plutôt habitués à ce que ce soit l'accélération qui soit fonction des conditions extérieures. Et d'ailleurs effectivement, pour avoir une formule qui ressemble plus à la mécanique classique, Bohm a proposé une version équivalente de la théorie, qui introduit non pas une « formule de guidage » pour la vitesse, mais un « potentiel quantique » :

$$V_{\text{quantum}}(\mathbf{r}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta |\Psi(\mathbf{r}, t)|}{|\Psi(\mathbf{r}, t)|}$$

Moyennant des conditions initiales adéquates, on peut montrer qu'il revient au même d'écrire la loi de Newton pour la position bohmiennne avec ce potentiel supplémentaire, ou d'utiliser la condition de guidage. Si on désire vraiment avoir des forces, on peut le faire dans le cadre de cette théorie, ou interprétation.

Un autre point très important, sur lequel je reviendrai aussi, est que pour rendre la théorie strictement équivalente à la mécanique standard (avec un guidage ou un potentiel supplémentaire), il faut préciser les conditions initiales sur la distribution des positions R. Il faut supposer qu'à un instant initial, n'importe lequel, la position initiale R de la particule n'est pas connue, mais distribuée aléatoirement dans l'espace avec une probabilité donnée par le carré du module de la fonction d'onde à l'instant initial. Pour N particules, cela donne la distribution de probabilité D suivante pour leurs positions bohmiennes $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N$:

$$D(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N) = |\Psi(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_N)|^2$$

Dans l'espace à 3N dimensions, on suppose donc que les positions $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ etc. sont réparties de façon aléatoire selon le carré de la fonction d'onde.

Cette condition s'appelle quelque fois « équilibre quantique ». Une fois qu'on l'a postulée à l'instant $t=0$, n'importe quel étudiant en mécanique quantique sait montrer que la condition est vérifiée aux instants ultérieurs. Cette façon de voir rappelle une approche qui a été inventée en fait à la même époque que la théorie de de Broglie, la théorie de Madelung de l'hydrodynamique quantique. Si on fait cette hypothèse, on peut montrer qu'on retrouve à tout instant exactement les conditions de la mécanique quantique standard.

Chacune des N particules est pilotée par la fonction d'onde de l'ensemble des particules – c'est important –, mais garde à tout instant une position parfaitement définie, fonction de sa position initiale.

Michel Le Bellac. Et si l'on ne suppose pas la règle de Born, que se passe-t-il ? Peut-on avoir des ennuis ?

Franck Laloë. La mécanique de de Broglie et Bohm n'a pas besoin de la règle de Born. Elle la déduit de la distribution initiale des positions. On postule l'équilibre quantique ; il est non démontrable et remplace la règle de Born. Mais ce qui est facilement démontrable, c'est que si on le postule à un instant zéro, il reste valable à tout instant. Il y a là un postulat très fort.

Édouard Brézin. Y a-t-il une généralisation à la théorie des champs ?

Franck Laloë. Oui, je vais en parler rapidement plus tard.

Alain Aspect. Cela veut dire qu'implicitement, on se dit qu'à un temps zéro, de toute façon, on ne peut pas connaître l'état de la particule mieux qu'on peut le faire en physique quantique, puisqu'on s'interdit d'avoir une loi de probabilité qui ne serait pas celle de la fonction d'onde quantique.

Franck Laloë. Tout à fait. Ce point se trouve être fondamental pour assurer, non seulement la compatibilité avec la mécanique quantique standard, mais aussi celle avec la relativité. Si on supposait qu'on soit capable de préparer des distributions initiales de particules qui soient différentes de l'équilibre quantique, on peut montrer qu'il serait alors possible de transmettre des signaux plus vite que la lumière. Ce serait donc relativement catastrophique. On est donc vraiment forcé de faire cette hypothèse d'équilibre quantique si on veut ne pas remettre en question la relativité.

Suite de l'exposé

Franck Laloë. Donc, si on fait ces hypothèses qui, je vous le concède, sont des hypothèses fortes et qui ne vont pas de soi, à ce moment-là on arrive à une théorie pratiquement équivalente dans ses prédictions à la mécanique quantique standard (.. même si Pauli ne l'avait pas réalisé et si de nombreux auteurs l'oublient de façon récurrente). On trouve toujours (en particulier sur ArXiv) nombre d'articles dans lesquels les auteurs indiquent avoir prouvé que la théorie dBB était fautive et que seule la mécanique quantique standard donne les bonnes prédictions. C'est une absurdité puisque les prédictions sont les mêmes.

On suppose explicitement que les mesures portent toujours sur des positions. C'est certes une limite, mais au fond ce n'est pas très grave. Si vous réfléchissez à tous les types

d'expériences que l'on peut faire en physique, au bout du compte on a toujours une aiguille qui va se déplacer sur un cadran...

Quelques autres petites remarques au passage. La « formule de guidage » montre que la vitesse ne dépend que des variations relatives de la fonction d'onde. Peu importe que le module de cette fonction d'onde soit grand ou petit, mais il faut qu'il ne soit pas nul. Cela paraît être un problème, surtout évidemment si les positions des particules peuvent atteindre des régions où la fonction d'onde s'annule et où la vitesse est indéterminée. Mais, heureusement, on peut montrer que les particules qui, initialement, étaient distribuées dans le nuage de probabilité ne peuvent jamais en sortir. On n'arrive jamais à des contradictions, les particules ne quittent jamais leur fonction d'onde, et tout « se passe bien ».

En outre, je l'ai déjà dit, les fonctions d'onde pilotent les positions des particules. Mais, inversement, les positions n'ont aucune rétroaction sur les fonctions d'onde, ce qui n'est pas interdit, mais constitue une violation flagrante de la symétrie habituelle entre action et réaction qui est courante en physique.

Jean-Michel Raimond. Comment mettez-vous des potentiels entre les particules si elles interagissent entre elles ?

Franck Laloë. Exactement comme d'habitude en mécanique quantique standard. L'équation de Schrödinger reste exactement la même, et l'équation pilote ne change pas non plus. On ne met pas d'interaction directe entre les R. L'interaction entre les particules est prise en compte par la fonction d'onde Ψ , qui ensuite pilote les particules de sorte que leurs positions à tout instant redonnent exactement les mêmes résultats statistiques que la mécanique quantique.

Edouard Brézin. Donc, à ce stade, on a introduit des variables nouvelles, qu'on appelle positions. Mais pour l'instant, le formalisme de la mécanique quantique n'est en rien modifié. On peut oublier ou ne pas oublier ces positions, cela ne change rien à la dynamique du système.

Franck Laloë. Exactement. Et c'est là probablement l'une des raisons très simples pour laquelle la plupart des physiciens n'utilisent jamais cette théorie. De toutes façons il faut faire un calcul standard de mécanique quantique, qui reste automatiquement valable dans la théorie dBB, et ce n'est qu'ensuite qu'on peut si on le désire ajouter les positions. Utiliser la théorie standard demande moins de travail, pourvu évidemment qu'on renonce à obtenir des trajectoires.

Edouard Brézin. L'image des trajectoires peut aider certains. Mais je reviens à mon idée. Dans le fondamental de l'atome d'hydrogène, par exemple, la fonction d'onde est réelle, comme nous le savons. Cela veut dire que la position attribuée par ce formalisme à des neutrons est une position immobile. Ce n'est pas tout à fait comme cela que je me représente l'électron qui tourne autour d'un proton. Mais c'est cela, la position. Les gens qui appellent « position » suivant de Broglie préfèrent ce point de vue.

Franck Laloë. Je compte parler assez en détail des trajectoires paradoxales de Bohm et de Broglie. En mécanique quantique standard, dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, le courant de probabilité est partout nul, et on peut dire si on veut que l'électron est immobile.

Bernard d'Espagnat. Selon la théorie dBB, dans le fondamental de l'atome d'hydrogène l'électron et le proton, tout électrisés qu'ils soient, restent effectivement immobiles, « à se regarder en chiens de faïence » peut-on dire. Et, bien sûr, ce n'est pas comme ça que nous,

physiciens, nous représentons d'habitude l'atome d'hydrogène. Mais pourquoi pas ? Si les calculs théoriques sont d'accord avec l'expérience, ce qui est le cas, il n'y a rien à dire.

Edouard Brézin. Pardonnez-moi. Si j'intervenais, c'est parce que les calculs ne dépendent pas de ces variables. On a souvent dit qu'on peut leur donner le nom qu'on veut, pour l'instant la dynamique, ou la mécanique, n'est en rien changée. ...c'est une question de goût !

Bernard d'Espagnat. Aussi longtemps qu'on reste dans les domaines où le problème de la mesure - avec son corollaire, celui de la « réduction du paquet d'onde » - n'intervient pas je dirais en effet, comme vous, que le choix entre mécanique quantique standard et théorie dBB est question de goût. Car dans ces domaines la fonction d'onde ne soulève pas plus de problèmes conceptuels vraiment fondamentaux que ne le font les champs classiques. L'ennui c'est que la mécanique quantique ne peut pas être confinée en ces domaines. Le problème de la « réduction » s'y pose très vite, sans échappatoire possible. Et dès qu'il l'aborde le théoricien n'arrive plus à préserver son instinctive ontologie réaliste qu'au moyen d'échappatoires aussi invraisemblables que la théorie d'Everett... à moins précisément de se rallier à celle de dBB ! Sauf bien sûr à admettre de petites modifications plus ou moins *ad hoc* de l'équation de Schödinger, ou de reconnaître explicitement que la physique tout entière n'est que la source d'excellentes recettes de prédictions d'observations. C'est cela la différence, si vous voulez. C'est là-dessus que Bohm insistait. L'intérêt, disait-il, de ma théorie est qu'elle est *ontologiquement interprétable*.

Jean-Michel Raimond. Cela ne pose pas de problème avec le principe de correspondance ? Si on prend un état suffisamment excité, on devrait retrouver la mécanique classique. Or dans la mécanique bohmienne, l'électron est immobile. Tous les états excités ont toujours une fonction d'onde réelle.

Alain Aspect. C'est intéressant. Cela veut donc dire que même si l'on cherche à faire le principe de correspondance, les R ne suivent pas les trajectoires classiques qu'on espérerait trouver.

Jean-Michel Raimond. Ce sont seulement les fonctions d'onde réelles qui engendrent une vitesse nulle. Elles n'ont pas de raison d'obéir au principe de correspondance.

Franck Laloë. Dans l'état fondamental de l'atome d'hydrogène, on a l'électron et le proton qui s'attirent par le potentiel de Coulomb. En théorie dBB, la force d'attraction est exactement compensée par le potentiel de Bohm que je décrivais tout à l'heure. Les deux particules ne bougent pas ; la somme des forces est nulle. En mécanique quantique standard, le courant de probabilité est nul en tout point ; en ce sens, l'électron ne bouge pas non plus.

Alain Aspect. Exactement.

Franck Laloë. On dit souvent que le « dessin atomique » représentant des électrons qui tournent autour du noyau comme des satellites autour de la Terre n'est pas du tout dans l'esprit de la mécanique quantique standard, et c'est vrai. Les particules n'ont ni position ni vitesses bien définies, et il est illusoire de dire que l'électron tourne autour du proton. Pourquoi l'électron tournerait-il mieux en théorie dBB ? Il n'y a pas de raison. De plus, pour un état de nombre quantique m , on a le choix entre prendre cet état et trouver une rotation, ou (en l'absence de champ magnétique) le superposer à $-m$ et supprimer la rotation. L'image standard n'est pas exempte de paradoxes non plus.

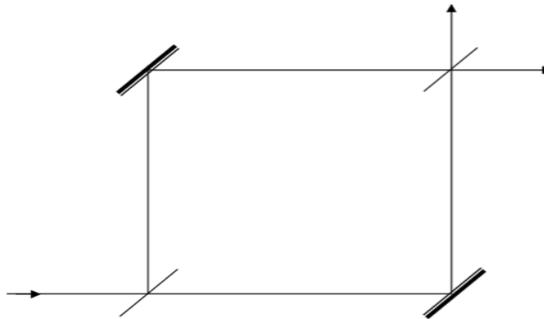
Alain Aspect. Vous avez raison. L'état S ne tourne pas non plus en mécanique quantique orthodoxe.

Suite de l'exposé

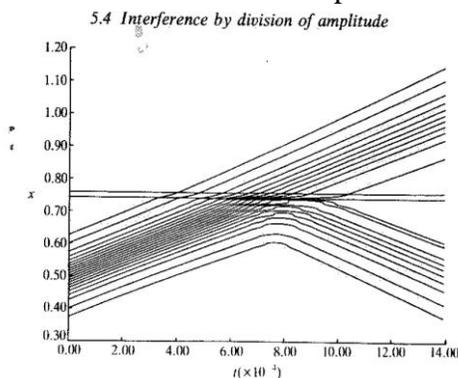
Franck Laloë. Nous reviendrons sur les trajectoires dans quelques instants, si vous le voulez bien. Ma dernière remarque consiste à insister sur le fait que la fonction d'onde est un champ réel, un petit peu comme un champ électromagnétique, qui a deux composantes électrique et magnétique. Comme disait Bell, « personne ne peut comprendre la mécanique bohémienne s'il ne renonce pas à la vue standard selon laquelle la fonction d'onde n'est qu'un outil mathématique donnant des amplitudes de probabilité ». Cependant, nous l'avons vu, lorsqu'il y a plusieurs particules, cette fonction d'onde se propage dans l'espace des configurations. Donc pour un gaz à 10^{23} particules, la physique se produit dans un espace de dimension absolument énorme ! Le champ réel de Bohm est donc très différent d'un champ classique.

2. Trajectoires

Commençons par une petite expérience de Mach-Zehnder.



Je présente d'abord ce qui se passe du point de vue de Bohm sur une seule lame séparatrice. Cette figure est tirée de l'ouvrage de Peter R. Holland, *The Quantum Theory of Motion* (Cambridge University Press, 1993). On suppose qu'un paquet d'ondes associé à une particule arrive sur une lame semi-réfléchissante. Holland a représenté un certain nombre de



trajectoires, avec des positions en fonction du temps de la particule qui arrivent. On fait suivre à chaque position le courant de probabilité, selon l'équation pilote de guidage. On voit alors qu'il se produit quelque chose de relativement simple : les particules qui étaient plutôt sur la gauche passent plutôt par la droite et celles qui étaient plutôt sur la droite se réfléchissent. Dès que l'on voit cela, bien sûr, la première réaction de chacun d'entre nous est de se dire que ça ne peut pas marcher et que cela ne reproduit certainement pas les conditions de la mécanique quantique. Mais c'est faux ! En fait, les positions des particules à chaque instant reproduisent exactement les prédictions de la mécanique quantique.

Alain Aspect. Je pense à l'expérience du choix retardé. Si on met brutalement la lame semi-réfléchissante, on passe d'une situation initiale où l'on avait des tuyaux, ou des lignes, qui allaient de bas en haut vers cette situation-là.

Franck Laloë. C'est cela. Au moment précis où j'insère la lame séparatrice, c'est ce qui se produit. La particule suit ensuite ces lignes.

Michel Le Bellac. Le potentiel quantique, que vous avez présenté tout à l'heure, change à partir du moment où l'on change le dispositif expérimental et donc l'évolution de la fonction d'onde. Ce potentiel guide ensuite la position.

Franck Laloë. Ce schéma montre qu'il est possible de faire une rétrodiction sur la position de la particule, puisque le trajet des particules après passage sur la lame séparatrice donne une information sur leurs positions possibles avant qu'elles ne l'atteignent. En revanche, il n'est pas possible d'en faire une prédiction. On ne peut pas connaître à l'avance la position d'une particule, et savoir si elle va rebondir ou pas. Certains y voient l'indication que la théorie bohémienne doit être considérée comme une théorie purement rétrodictive.

Alain Aspect. Certaines trajectoires arrivent d'en haut, aussi, dans Mach-Zhender. Là, vous ne parlez que de celles qui arrivent du bas.

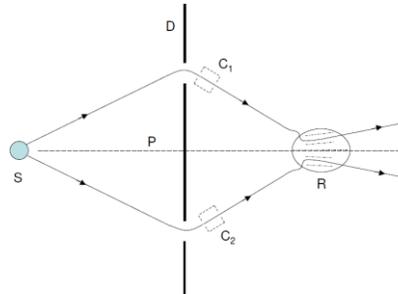
Franck Laloë. En effet, j'évoquais-là une seule lame semi-réfléchissante. Je reviens donc au schéma de Mach-Zhender et à la recombinaison des faisceaux en sortie. Le phénomène que je viens de discuter se produit sur la première lame séparatrice, avec des trajectoires qui partent selon deux directions. Sur la seconde lame arrivent des particules du haut et du bas. Sur cette lame la fonction d'onde, c'est-à-dire l'objet réel qui s'est propagé, interfère – comme le ferait un champ acoustique – et sort avec une intensité plus ou moins grande selon les deux voies possibles. La façon dont la particule se trouve guidée sur la dernière lame réfléchissante dépend de cette interférence.

Si l'interférence est entièrement constructive pour la sortie du haut, la particule est emportée par cette interférence et emprunte nécessairement cette sortie. Si elle destructive et constructive dans la sortie du bas, la particule est guidée dans la sortie du bas. Dans les cas intermédiaires, vous trouvez que la probabilité qu'elle se réfléchisse vers le haut ou vers le bas est exactement ce que prévoit la mécanique quantique.

Voilà donc un objet particule+onde qui reproduit parfaitement ce que dit la mécanique quantique lors de ses réflexions successives mais, pour autant, a gardé une trajectoire parfaitement définie à chaque instant. Le « only mystery » de Feynman n'est plus un mystère.

Allons plus loin, et étudions des trajectoires un peu plus paradoxales. Je vous propose de discuter une expérience classique d'interférences que vous connaissez tous, et que montre la figure. Que prédit la théorie bohémienne dans ce cas-là ?

Le fait que les particules de Bohm passent, soit par le trou du haut, soit par le trou du bas, ne nous étonne plus maintenant. En effet, lorsqu'elle quitte la source, la particule suit l'un des deux paquets d'onde, mais pas les deux à la fois. Lorsque la particule traverse l'un des trous, comme sa fonction d'onde diffracte sur les parois, la particule est perturbée de façon indirecte, et ne va plus en ligne droite. Elle peut donc être déviée comme représenté sur la figure ;



Lorsque les paquets d'onde issus des deux trous se recouvrent, il se produit un phénomène d'interférence. Cette interférence change le courant de probabilité ($\Psi^* \text{ gradient } \Psi$), qui comprend des termes dus à l'interférence entre deux paquets d'ondes. En conséquence, la trajectoire de la particule se met à osciller dans cette région. Une étude plus détaillée montre alors que la particule ne traverse jamais le plan horizontal de symétrie P.

Vous le voyez, nous sommes en présence d'une situation assez amusante parce que peu usuelle. Nous sommes tous habitués à ce que dans un espace une particule aille en ligne droite, ou à peu près (dans la mesure où une trajectoire quantique peut être définie). Ici, ce n'est pas le cas, les trajectoires ne sont plus rectilignes du tout. Le fait qu'il y ait interférence fait que la particule ne va pas du tout en ligne droite. Mais, bien sûr, on reproduit à nouveau exactement les positions de la mécanique quantique.

Dans la figure ci-dessus, C_1 et C_2 sont les cavités électromagnétiques ; pour le moment elles ne jouent aucun rôle, mais nous en parlerons plus tard. Le dessin suivant est plus réaliste que le mien ; il est tiré de l'ouvrage de Peter R. Holland.

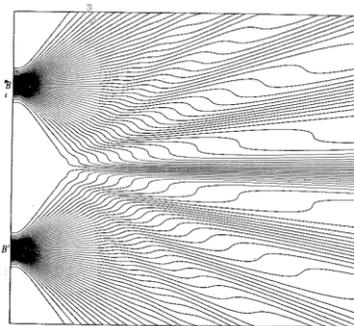


Fig. 5.7 Trajectories for two Gaussian slits with a Gaussian distribution of initial positions at each slit. The probability density is proportional to the number of lines per unit length in the y -direction (from Philippidis *et al.* (1982)).

Edouard Brézin. Cela, c'est la solution pour la variable R des équations précédentes ? Est-ce bien cela qui est porté ici ?

Franck Laloë. Oui, on a résolu l'équation de Schrödinger, puis on a calculé les trajectoires des positions bohmiennes guidées par la fonction d'onde, ce qui donne le résultat représenté. Ces oscillations ne sont pas une « invention » de la théorie de Bohm, elles existent en théorie standard pour le courant de probabilité. Mais en théorie de Bohm on les prend plus au sérieux.

Jean-Michel Raimond. Comment se joue la discussion standard de la complémentarité ? Savons-nous de quel côté est passée la particule ? Savons-nous de quel côté elle sort ?

Franck Laloë. Je vais, une fois de plus, vous demander l'autorisation de repousser la question, car j'ai prévu d'aborder ce sujet plus loin.

La suite de mon exposé prévoyait que je parle maintenant de l'atome d'hydrogène. La discussion ayant déjà eu lieu, il est inutile que je la reprenne. Pour tout système invariant par renversement du temps, on peut montrer que les vitesses bohmiennes sont nulles dans les états stationnaires du système. Pour l'atome d'hydrogène, même lorsque le nombre quantique m n'est pas nul, en l'absence de champ magnétique on peut superposer les fonctions d'onde m et $-m$ pour obtenir des fonctions d'onde réelles, et donc des vitesses bohmiennes nulles.

Jean-Michel Raimond. Si on les superpose, elles n'ont aucune raison d'obéir au principe de correspondance.

Franck Laloë. Oui. Il n'y a plus vraiment de principe de correspondance entre ondes et particules ; il n'y en a plus besoin à partir du moment où les trajectoires existent déjà dans la théorie. Il suffit de montrer que ces trajectoires ont une bonne limite classique. Il n'y a plus de complémentarité entre ondes et particules non plus, juste une juxtaposition. Il faut renoncer à un certain nombre de notions auxquelles nous sommes habitués.

Jean-Michel Raimond. Ce que dit le principe de correspondance, c'est qu'on doit retrouver des trajectoires classiques ou quasi classiques. Il faudrait donc que les trajectoires bohmiennes se centrent sur des trajectoires classiques ou quasi-classiques. Sinon, la mécanique quantique et celle de Bohm ne seraient pas d'accord.

Franck Laloë. Absolument. En mécanique quantique, on traite des paquets d'onde et on montre par l'utilisation du théorème d'Ehrenfest qu'ils se déplacent avec une bonne approximation selon les trajectoires classiques. La théorie de Bohm, elle, est construite dès le départ pour que les R suivent les paquets d'onde. Donc, automatiquement, on évitera tout conflit.

Edouard Brézin. Si vous le permettez, je voudrais comprendre l'ontologie dont parlait Bernard d'Espagnat dans ce cas-là. Si je prends un électron dans cet état réel et immobile au sens où vous l'exprimez, j'aimerais comprendre pourquoi cet électron ne tombe pas sur le proton, ce qui minimise l'énergie potentielle. Or, nous le savons depuis Heisenberg, s'il ne tombe pas, c'est parce qu'en réalité, plus il se rapprocherait du proton, plus sa vitesse serait grande – c'est cela, l'image habituelle –, et dans ces conditions, on perdrait de l'énergie potentielle mais on gagnerait de l'énergie cinétique. Toute cette image qui explique pourquoi il y a un équilibre qui fait que l'électron ne tombe pas et que l'atome d'hydrogène occupe un volume fini et non pas nul, toute

cette situation est complètement due à cet équilibre entre vitesse et énergie potentielle que nous explique Heisenberg, et je n'en retrouve plus rien dans l'image qui est là.

Franck Laloë. Ici ce même équilibre est dû au potentiel quantique. Je note au passage que l'opérateur de position habituel de la mécanique quantique ne se confond pas avec la position bohmiennne (ici notée **R**). La relation (dite « d'incertitude ») de Heisenberg qui opère entre cet opérateur et l'opérateur impulsion ne concerne en rien la position bohmiennne (si on lui appliquait le principe d'Heisenberg, on aurait évidemment une énergie infinie). Ce qui affecte **R** est uniquement le guidage par la fonction d'onde ou, si on préfère, le potentiel quantique de Bohm. Il ne faut pas appliquer à la position de Bohm ce qu'on applique habituellement à l'opérateur position dans l'espace des états.

Edouard Brézin. Donc, pour moi, la position de la particule n'est pas vraiment la position bohmiennne.

Franck Laloë. Exactement : l'opérateur position auquel nous sommes tous habitués n'est pas la position bohmiennne.

Edouard Brézin. Il faut donc imaginer une force complémentaire

Bernard d'Espagnat. Il n'y a pas à l'imaginer, elle émerge de la fonction d'onde.

Alain Aspect. L'électron est immobile et il ne tombe pas...

Bernard d'Espagnat. Comme Franck l'a signalé, il suit des axiomes de la théorie de Bohm que de l'existence de la fonction d'onde - qui y est tenue pour physiquement réelle comme Franck l'a dit - résulte un *potentiel quantique*, générateur d'une force comme tout potentiel. Et le calcul montre que dans le cas particulier que nous considérons cette force compense exactement l'attraction électrique. C'est inattendu mais tout simple et sans mystère.

Edouard Brézin. L'équation pour **R** nous montre la compétition entre le **V** coulombien et le **V** quantique. C'est cela ?

Bernard d'Espagnat. Oui, tout à fait.

Franck Laloë. De façon générale, ce qui me semble dangereux dans ce domaine est de chercher à prolonger les habitudes quantiques. Si l'on cherche à confondre en un seul et même objet la position de Bohm et les opérateurs dans l'espace de Hilbert, on va au devant de problèmes. Il faut vraiment accepter que ce sont deux types de grandeurs différentes : un opérateur position qui existe toujours comme en théorie standard, une position bohmiennne en supplément. Tout ce que l'on sait habituellement sur la mécanique quantique s'applique aux opérateurs, aux vecteurs d'état, à la fonction d'onde. Je conviens que la notation **R** que j'ai prise pour la position bohmiennne, pour traditionnelle qu'elle est, n'est pas nécessairement la meilleure, vu qu'elle peut engendrer une confusion avec l'opérateur position, souvent, lui aussi, désigné par **R**.

Edouard Brézin. D'accord.

Jean-Michel Raimond. De toute façon, vu que les prédictions des deux théories sont les mêmes, on ne va pas prendre l'une en défaut comme cela !

Edouard Brézin. Non, mais j'essaie simplement de me faire une représentation puisque c'est cela dont il s'agit en théorie dBB.

Suite de l'exposé

Franck Laloë. Tout ce que nous avons dit est, bien sûr, général. Si l'hamiltonien est invariant par renversement du temps, on peut lui trouver une base d'états stationnaires dont les fonctions d'onde sont réelles, qui correspondent à des vitesses nulles en tout point de l'espace. On peut donc construire une base d'états propres, où les particules n'ont aucune vitesse ; tous les états stationnaires sont des états où les positions bohmiennes sont statiques. Ce qui ne veut pas dire, nous y reviendrons, que leur fonction de corrélation est indépendante du temps.

Plusieurs particules

Prenons maintenant l'exemple de deux particules, qui est le cas qu'a mentionné Alain Aspect tout à l'heure. Les variations des positions de Bohm, \mathbf{R}_1 et \mathbf{R}_2 , sont données par :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\mathbf{R}_1 &= \frac{1}{m_1|\Psi(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2; t)|^2} \operatorname{Re} \left[\frac{\hbar}{i} \Psi^*(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2; t) \nabla_{\mathbf{R}_1} \Psi(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2; t) \right] \\ \frac{d}{dt}\mathbf{R}_2 &= \frac{1}{m_2|\Psi(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2; t)|^2} \operatorname{Re} \left[\frac{\hbar}{i} \Psi^*(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2; t) \nabla_{\mathbf{R}_2} \Psi(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2; t) \right]\end{aligned}$$

Bien sûr, quand la fonction d'onde Ψ est un produit, une simplification est possible entre numérateur de dénominateur, et l'on voit immédiatement que chaque particule évolue indépendamment de l'autre.

Cela devient particulièrement intéressant, bien sûr, si la fonction d'onde totale n'est pas un produit. Rappelez-vous qu'à chaque instant, on a un seul \mathbf{R}_1 et un seul \mathbf{R}_2 . Ce qui nous intéresse, pour savoir l'évolution de \mathbf{R}_1 et \mathbf{R}_2 , c'est la valeur de la fonction d'onde en ce point dans l'espace à 6 dimensions, puisque cela va donner la vitesse. Si la fonction d'onde n'est pas un produit, en général la vitesse de chaque particule dépend de la position de l'autre, puisqu'il faut calculer la dérivée en un point de l'espace à 6 dimensions qui dépend des deux positions. On peut commencer, pour se familiariser, avec le cas où la fonction d'onde totale a juste deux constantes

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2; t) = \alpha \varphi(\mathbf{r}_1, t) \chi(\mathbf{r}_2, t) + \beta \varphi'(\mathbf{r}_1, t) \chi'(\mathbf{r}_2, t)$$

Si à l'instant t , l'une des deux fonctions d'onde s'annule au point de l'espace à 6 dimensions, un seul des termes de (8.16) joue un rôle, de sorte que la fonction d'onde de la particule 2 disparaît de l'expression de la vitesse de la particule 1 au point \mathbf{R}_1 . La localité est alors satisfaite. En revanche, si les deux fonctions d'onde sont simultanément non-nulles pour les positions de Bohm, alors la même simplification ne se produit plus. En général, apparaissent des effets non locaux.

Le point important à souligner est que, dans la situation où les deux paquets d'onde associés à l'une des particules ne se recouvrent pas, on est toujours dans le premier cas. Il n'est en effet alors pas possible de trouver des positions bohmiennes qui n'annulent pas au moins un des deux termes de la superposition. On aura toujours une évolution découplée entre les particules. Il faut qu'il y ait un recouvrement des fonctions d'onde des deux paquets d'onde des deux particules pour ne pas être dans le cas où les évolutions sont découplées.

L'onde qui ne joue aucun rôle lorsque les paquets d'onde ne se recouvrent pas, c'est ce que Bohm appelle une « onde vide ». Elle existe toujours dans l'équation de Schrödinger, mais elle ne joue plus aucun rôle pour l'évolution du système. C'est ce qui fournit à Bohm son mécanisme de la mesure. Mais, avant cela, je souhaite dire quelques mots de la particule à spin.

Spin

Nous prenons la théorie du spin de Pauli, pour avoir un calcul aussi simple que possible. Chaque particule est alors décrite par un spineur à deux composantes. La vitesse de la particule (il y a une seule vitesse, pas une par composante du spin) est définie par le courant local de probabilité, donc la somme des deux vitesses associées à chacune des valeurs du spin.

On obtient alors une image où, non seulement la particule a une trajectoire, mais où en plus, une direction du spin puisqu'en chaque point R on dispose d'un spineur à deux composantes qui permet de calculer cette direction du spin. La particule se déplace dans l'espace et garde à chaque instant une direction de spin. Une figure permet de mieux visualiser.

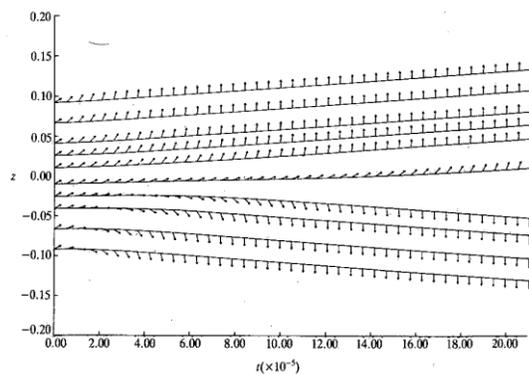
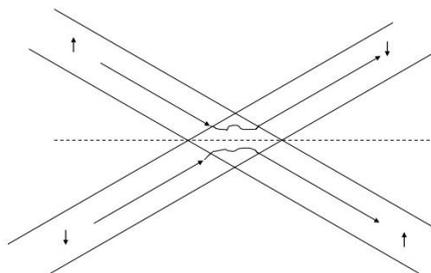


Fig. 9.13 Trajectories and orientations $\theta(z, t)$ associated with Figs. 9.10 and 9.11 (from Dewdney, Holland and Kyprianidis (1986)).

De même qu'une particule ne va pas nécessairement en ligne droite dans l'espace libre, de même la direction de spin peut tourner le long de sa trajectoire.

Reprenons l'exemple ci-dessus où deux paquets d'onde se croisent et supposons que le paquet d'onde qui vient du haut ait un spin up, celui qui vient du bas un spin vers le bas.



Qu'est-ce que cela donne dans la région d'interférence ? Cela donne une espèce de rebondissement : c'est-à-dire que la particule avec un spin par dessus va, à cause de l'interférence, retourner son spin et rebondir vers le haut. Et réciproquement. Nous avons donc des situations avec lesquelles on n'est pas du tout familier.

Alain Aspect. Mais on obtient le résultat habituel pour les prédictions physiques. Si les spins sont orthogonaux, ils n'interfèrent pas.

Franck Laloë. Absolument.

Alain Aspect. A la fin, si on regarde à la sortie, ils ne se sont pas vus. Ou du moins, on dirait, vu de l'extérieur, qu'ils ne se sont pas vus.

Franck Laloë. Exactement. On obtient le même résultat, y compris dans la zone de recouvrement des paquets d'onde.

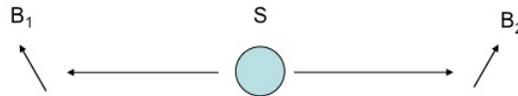
Edouard Brézin. Si les deux électrons sont des fermions, partant du principe de Pauli...

Franck Laloë. L'interférence négative des fermions va se produire de la même façon en théorie dBB et en théorie classique, pour les mêmes raisons. Les particules vont suivre les interférences induites par la statistique et reproduire parfaitement le principe de Pauli.

Suite de l'exposé

Expérience EPRB : émission dans des directions opposées de deux spins se trouvant dans un état sigulet

Franck Laloë. L'expérience doit être décrite dans l'espace des configurations. Il y a donc deux particules qui, chacune, ont un $R - c$ 'est l'espace des configurations R_1 et R_2 qui nous intéresse.



Les deux particules à spin se propagent vers les gradients de champ magnétiques B_1 et B_2 créés par les deux aimants de Stern-Gerlach permettant des mesure des composantes des spins. Nous supposons que la fonction d'onde n'est pas un produit, un singulet par exemple. Dans ce cas, la déviation de la première particule par B_1 change la position du point dans l'espace des configurations à 6 dimensions, et réagit sur la vitesse de la seconde particule d'une façon qui dépend de B_1 . La direction de B_1 influe sur la direction que va prendre la particule 2 et réciproquement. On n'est donc pas surpris de constater qu'on arrive sans problème à reproduire la mécanique quantique et à violer les inégalités de Bell.

Jean-Michel Raimond. Cela pose quand même des problèmes conceptuels qui me paraissent presque aussi graves que ceux de la physique quantique.

Franck Laloë. Les équations dynamiques de guidage de la théorie de Bohm sont explicitement non-locales. Si vous réinjectez la localité dans le raisonnement à ce stade, il ne reste plus aucun espoir de retrouver les résultats de la mécanique quantique.

Edouard Brézin. Evidemment. Mais on voit bien que ce qui arrive à la particule 2 dépend terriblement de ce qu'on a fait faire à la particule 1 (si on lui a mis un champ magnétique au passage ou pas), dans cette image.

Franck Laloë. Tout à fait. En mécanique quantique standard aussi, si on applique le postulat de réduction, la mesure effectuée par Alice projette instantanément l'état du spin de Bob. De fait, à ma connaissance, personne n'est capable de donner une description quantique standard réellement locale de cette expérience, quelle que soit l'interprétation.

Plus précisément : si l'on suit Von Neumann, comme je viens de le dire on va utiliser un postulat de réduction qui n'est pas local. Si l'on suit Bohr, on utilise la description globale de l'expérience, qui n'est pas un événement de l'espace-temps et qui n'est donc pas locale non plus. La théorie des histoires cohérentes ne donnera pas plus une description locale. Pour finir, personne ne sait vraiment décrire cette expérience de façon locale d'un bout à l'autre. Les bohmiens revendiquent comme un avantage de leur théorie de mettre en avant cette non-localité.

Michel Le Bellac. Cela dit, la mathématique complète de cette expérience, par exemple dans l'ouvrage de Peter Holland, est absolument abominable. Je n'ai pas pu aller jusqu'au bout.

Alain Aspect. C'est vrai ? Même vous, Michel ? Je n'y crois pas !

Michel Le Bellac. Ce sont des équations absolument épouvantables.

Bernard d'Espagnat. Il y a, dans le petit livre de Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, que vous connaissez probablement, un traitement assez explicite de ce problème dans la théorie de Bohm. Les calculs de Bell montrent que la seconde particule, celle qui interagit le plus tard avec son appareil, obéit non pas à son paramètre caché, mais à ce qui se passe avec l'autre particule (ce qu'il est advenu d'elle quand elle a interagi avec son instrument). Les calculs sont faits.

Michel Le Bellac. Effectivement, qualitativement. Mais trouver le facteur moins cosinus de l'angle est très pénible en théorie dBB.

Franck Laloë. ...je ne suis pas d'accord. Si l'on veut retrouver en théorie bohmienne les résultats de la mécanique quantique, il n'y a aucun calcul supplémentaire à faire. On le sait de façon générale, le calcul standard habituel donne la moyenne sur toutes les positions initiales. En revanche, si l'on veut aller plus loin et faire comme Peter Holland, c'est-à-dire montrer des trajectoires explicites et donc faire plus que la mécanique quantique standard, c'est là que de nouveaux calculs deviennent nécessaires, qui peuvent être difficiles. Mais si l'on veut juste retrouver ce qui est déjà connu en mécanique quantique standard, il n'y a pas de problème et aucun effort particulier à faire.

Alain Aspect. Forcément. C'est une tautologie, ce que vous venez de dire. Si l'on veut retrouver la mécanique quantique, comme on est parti de la mécanique quantique, il n'y a rien de plus à faire.

Michel Le Bellac. Je ne suis pas convaincu.

Michel Bitbol. Une petite précision : vous disiez qu'il n'y a pas de description vraiment locale de ce phénomène de corrélation. Mais sous certaines conditions, cette difficulté peut être surmontée. Nous aurons bientôt un exposé de Smerlak et Rovelli, dans lequel ils affirment que la

mécanique quantique offre bel et bien une forme de description locale. Pour en arriver à cette lecture, ils ont besoin de recourir à une forme vraiment extrême d'opérationnalisme. Nous aurons l'occasion d'en discuter.

Edouard Brézin. Et donc la causalité est *ab initio* abandonnée.

Michel Bitbol. Tout à fait.

Bernard d'Espagnat. Mais d'un autre côté la théorie de Smerlak et Rovelli est un affaiblissement de la notion de réalité.

Michel Bitbol. Oui, c'est cela.

Bernard d'Espagnat. Alors que celle de Bohm est pleinement réaliste. C'est une théorie qui décrit la nature comme elle est, indépendamment de notre connaissance.

Suite de l'exposé

Franck Laloë. Etudions maintenant un autre cas simple auquel tout le monde peut penser :



On mesure le spin de la particule selon les directions successives B_1, B_2, B_3 , etc. . Comme nous l'avons vu (rétrodiction), chaque fois qu'on fait une mesure, dans le point de vue de Bohm on raffine l'information sur la position initiale de la particule. Donc on pourrait penser que, au bout de très nombreuses mesures, cette information sera tellement précise qu'on arrivera à prédire le résultat des mesures ultérieures de façon certaine. Est-ce vraiment le cas ? La réponse est bien sûr négative : quel que soit le nombre de mesures effectuées, le résultat des suivantes sera toujours aléatoire et conforme à la prédiction quantique standard. La raison en théorie dBB en est que, plus vous augmentez le nombre de mesures, plus vous arrivez à une situation chaotique. On arrive à une situation de chaos classique où la sensibilité aux positions initiales augmente avec le nombre de mesures faites. Donc, pour finir, on retrouve l'impossibilité de jamais prédire avec certitude le résultat de la mesure suivante.

3. La mesure

Appliquons le modèle de von Neumann d'une mesure idéale. Désignons la fonction d'onde du système mesuré par φ et la fonction d'onde de l'appareil de mesure par χ . J'ai mis beaucoup de positions car j'imagine qu'il y en a un très grand nombre. Après la mesure, la fonction d'onde totale est une somme sur j :

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N; t) = \sum_j \varphi_j(\mathbf{r}, t) \chi_j(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N; t)$$

Je décris ici l'état quantique de l'appareil de mesure et du système mesuré après leur interaction mutuelle – ils sont donc intriqués. Cet état est une somme sur les états possibles de l'appareil de mesure correspondant à différentes positions du pointeur. Or nous savons que la position R_1, R_2 etc. dans l'espace des configurations doit forcément tomber dans le domaine où l'un des morceaux d'une superposition est non-nul. Mais les fonctions χ différentes ont des supports disjoints. C'est évident dès que l'on se rappelle que pour que deux fonctions de N variables n'aient pas de recouvrement spatial il suffit que les deux supports de l'une quelconque de ces variables soient disjoints ; en effet dans le cas considéré il existe forcément une variable de position, qui est par exemple celle du centre de masse de l'aiguille de l'appareil de mesure, qui après l'interaction système-instrument, se trouve dans un intervalle donné du cadran et ne se trouve donc dans aucun des autres. A l'instant t un seul des $\chi(R_1, R_2, \dots, R_N; t)$ n'est donc pas nul. La position bohémienne dans l'espace des configurations ne peut rendre non-nuls deux χ à la fois.

Michel Le Bellac. Oui certes. Si vous voulez distinguer entre les états différents du système mesuré, il faut bien que les états qui correspondent à l'appareil de mesure soient spatialement séparés. Franck Laloë ne fait que traduire cette hypothèse.

Alain Aspect. Je suis d'accord sur ce point.

Franck Laloë. On arrive ainsi à une situation où toutes les ondes à la sortie correspondant aux états, sauf une, sont toutes des « ondes vides ». C'est à mon avis un des points très forts de la théorie de Bohm : on a démontré, en quelque sorte, le postulat de réduction du paquet d'onde. On ne réduit pas la fonction d'onde, mais toutes les autres branches ne jouent aucun rôle et sont vides.

Dans le point de vue de Bohm, il y a une seule position du système dans l'espace des configurations, même si on ne la connaît pas. Il existe bien une position parfaitement précise et, avec cette position-là, seul un des membres de la solution peut jouer un rôle. Les autres existent toujours (comme en théorie d'Everett), mais on les laisse en quelque sorte dans les limbes à l'état virtuel; ils n'ont plus aucun rôle dans la physique.

Ainsi, la dynamique bohémienne ramène en quelque sorte le postulat de réduction du vecteur d'état à une règle effective, une commodité. Il n'est aucun besoin d'introduire deux postulats différents pour la dynamique quantique. Le processus de mesure est un processus physique d'interaction tout à fait ordinaire, ce qui ré-introduit une unité dans la théorie et évite toute distinction entre monde mesurant et monde mesuré. .

Cette propriété de la théorie de Bohm assure également la contextualité : à chaque ensemble de dispositifs expérimentaux agissant simultanément sur le système mesuré est tout naturellement associée une dynamique différente, donc une formation d'ondes vides différente. De ce point de vue, ce que nous dit Bohm est assez bohrien quand on y pense, puisque c'est l'ensemble de l'appareil de mesure qui compte, y compris toutes les positions de Bohm associées.

Pour résumé autrement ce grand succès de la théorie dBB : avec elle, la décohérence assure automatiquement l'unicité macroscopique, contrairement à la théorie standard où l'application d'un postulat est nécessaire pour supprimer des branches du vecteur.

Hervé Zwirn. Du coup, on n'a plus besoin de décohérence, d'une certaine manière. C'est même un peu gênant, d'ailleurs.

Franck Laloë. Pourquoi gênant, puisque les prévisions sont les mêmes ? Comme en mécanique quantique standard, il faut prendre en compte toutes les variables ; si on l'oublie, on arrive aux mêmes fautes qu'en mécanique quantique.

Hervé Zwirn. L'analyse du problème de la mesure qui est faite là est celle que l'on fait traditionnellement en mécanique quantique. On bute sur une difficulté puisque la chaîne de von Neumann ne s'arrête jamais, puis on fait intervenir l'environnement en ensuite on s'en sort. Mais là, on arrive à sortir de la chaîne de von Neumann sans avoir besoin de l'environnement, par le simple postulat que les supports étant disjoints, on a un seul résultat. On n'a donc plus besoin de l'environnement. C'est tout de même étrange.

Franck Laloë. Je dirais plutôt que, en théorie dBB, l'environnement constitué par l'appareil de mesure est suffisant pour assurer l'unicité macroscopique. Il n'est pas besoin d'aller plus loin et de faire intervenir des « pointer states » ou l'« envariance » comme Zurek. Mais la règle habituelle reste la même : chaque fois que l'environnement joue un rôle en mécanique quantique, il jouera aussi un rôle en mécanique bohmienne. Si vous voulez dire les choses de façon tranchée, on a toujours besoin de l'environnement, mais on n'en a plus besoin comme un *deus ex machina* qui produirait magiquement une unicité macroscopique.

Hervé Zwirn. C'est cela. Donc, à la limite, sans environnement, on arrive à décohérer.

Jean-Michel Raimond. L'appareil de mesure avec tout son espace de configuration comprend l'environnement, mais on n'en a plus besoin *stricto sensu*.

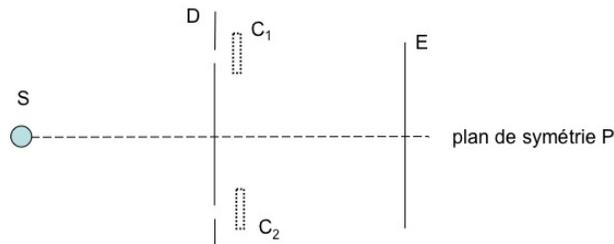
Franck Laloë. Si la décohérence, c'est la perte des cohérences, on n'a pas besoin d'utiliser la mécanique quantique de Bohm pour la comprendre. Toutes les interprétations en rendent compte facilement. C'est l'unicité du résultat, l'unicité macroscopique, qui émerge grâce au mécanisme de Bohm. On a beaucoup de mal à faire sortir cette unicité de la décohérence, voire même, à mon avis on n'y arrive pas.

Michel Bitbol. C'est d'ailleurs très intéressant. En décohérence standard, on peut très bien avoir perte des effets d'interférence sans apparition d'unicité. On n'a pas encore démontré (et sans doute n'y arrivera-t-on jamais) que la décohérence peut faire émerger l'unicité du résultat expérimental. Dans la théorie de Bohm, réciproquement, on peut avoir unicité sans perte de cohérence. Voilà qui est remarquable.

Franck Laloë. Absolument !

Les trajectoires « surréalistes » de la théorie dBB

Franck Laloë. J'en viens aux trajectoires surréalistes de la théorie dBB, en vous présentant une autre expérience intéressante, qui ressemble à la précédente, et qui a été traitée dans le cadre d'un article très intéressant par Englert, Scully, Süßmann et Walther que m'avait signalé Zurek – qui le considérait, lui, à tort à mon avis, comme une réfutation de la théorie de Bohm.



C'est une expérience qui admet un plan de symétrie P. Nous avons des atomes de Rydberg qui se propagent à partir d'une source S, passent par deux trous dans un diaphragme, et qui vont éventuellement interférer sur les points d'un écran E. Mais, au passage, on dispose de petites cavités électromagnétiques dans lesquelles ces atomes de Rydberg sont susceptibles de laisser un photon. On obtient ainsi une expérience « Welcher Weg ». Si jamais un photon est déposé dans une cavité, on peut le mesurer, et en pratique savoir dans quel bras est passée la particule, de sorte que l'interférence disparaît.

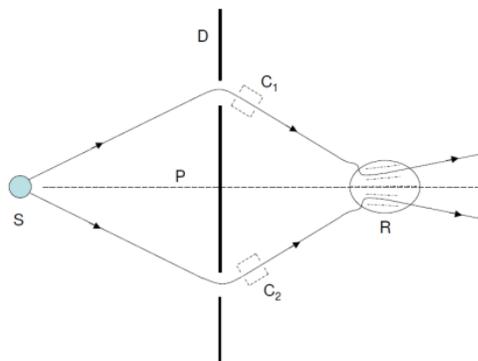
Ce qu'entendent faire Englert, Scully, Süssmann et Walther, c'est discuter cette expérience et montrer que, si on l'étudie en détail, la théorie dBB conduit à des trajectoires qu'ils appellent « surréalistes » - ce qui, je pense, est péjoratif dans leur esprit

Revenons donc au cadre de la mécanique quantique standard pour un instant. Elle prévoit qu'il existe des situations où l'atome laisse un photon dans la cavité C_1 et, après tout, comme il a été diffracté par le trou, il peut arriver que le photon soit laissé dans C_1 et que l'atome tombe dans la partie inférieure de l'écran E. Cela peut se produire, pas à tous les coups certes, mais de tels événements existent.

Maintenant, que donne cette expérience décrite en théorie dBB ?

Vue de la même expérience en théorie dBB

Vous vous rappelez qu'il existe cette règle du non croisement qui interdit aux trajectoires bohmiennes de traverser le plan de symétrie. C'est assez facile à démontrer : en mécanique quantique, le courant de probabilité reste toujours dans le plan de symétrie, et n'a donc jamais de composantes perpendiculaire à ce plan. Donc les particules qui l'approchent ne peuvent jamais le traverser le plan, elles ne peuvent que rebondir.



Que nous disent alors Scully et collègues ? Si les prévisions de la mécanique quantique standard sont vérifiées, il existe des situations où la particule laisse un photon dans la cavité du

haut, mais termine son voyage en dessous du plan de symétrie P. Elle a laissé un photon dans C_1 sans que sa trajectoire n'y soit jamais passée : c'est absurde et donc Scully et al. en concluent que la théorie dBB introduit des trajectoires surréalistes. L'argument est très bien trouvé et intéressant.

Mais nous allons voir que cette situation n'est paradoxale que si l'on se place dans une théorie mixte, c'est-à-dire si l'on veut être à la fois standard et à la fois dBB. Combiner des éléments logiques incompatibles comme cela ne marche pas.

Première remarque évidente et presque triviale que j'hésite à la faire : on est tombé précisément dans l'ornière qu'avait signalée Bell : le point de vue où les trajectoires de Bohm sont réelles mais pas les fonctions d'onde, qui restent des amplitudes de probabilité comme en mécanique quantique standard. Un pur bohmien répondra immédiatement que la fonction d'onde est en fait un champ doué de réalité et que, puisque ~~le champ associé~~ à la fonction d'onde est bien passée par la cavité où le photon a été laissé, aucun paradoxe ne se produit ; c'est simplement le champ associé à la particule qui a laissé un photon d'un côté tandis que la trajectoire de la particule passait tranquillement de l'autre côté. La seule chose qu'on a montrée par cette expérience de pensée, c'est que le champ de la particule et la trajectoire peuvent en quelque sorte se dissocier dans les effets qu'ils produisent localement. C'est une première réponse, qui vient à l'esprit assez facilement, mais qui montre quand même que dans l'attaque, il y a une incohérence logique.

Mais on peut aller un peu plus loin. En effet, il faut tenir compte du mécanisme des « ondes vides », dont nous allons voir qu'il fait disparaître les trajectoires « surréalistes ». En fait, la difficulté conceptuelle qu'introduisent Scully et coll. repose sur un raisonnement où, en mécanique quantique, on traite quantiquement le champ dans les cavités (cela sert à faire une trace partielle et à montrer qu'il n'y a plus d'interférence), tandis qu'en théorie dBB il n'y a pas de variable associée à ce champ. Mais ce traitement asymétrique est une erreur logique. En fait, la critique ne porte que sur une version tronquée de la théorie de Bohm, celle où les champs n'ont pas droit à une variable bohmiennne.

Ce qu'il faut faire, si l'on utilise la vraie théorie dBB dans le cadre de cette expérience, c'est donner une variable de position aux champs qui se trouvent dans les cavités. A ce moment-là, l'effet des ondes « vides » dont je parlais tout à l'heure se produit, une seule des ondes rayonnées par les deux trous d'interférence joue un rôle. Rien n'empêche plus les particules de traverser le plan de symétrie, et les trajectoires « surréalistes » disparaissent.

Ce que je cherche à souligner, c'est que si l'on fait un calcul quantique standard où l'on tient compte de la quantification du champ dans les cavités, il est illogique de donner un traitement dBB sans tenir compte également des variables dBB des champs. La règle est simple : chaque fois que des variantes quantiques sont introduites dans la mécanique standard, il faut introduire les variables de dBB correspondantes.

Jean-Michel Raimond. Concrètement, si vous excitez l'oscillateur, vous réintroduisez le droit de traverser le plan de symétrie. Cela donne une partie de fonction d'onde où on a le droit de passer le plan de symétrie. Le photon restaure la possibilité de croisement.

Franck Laloë. Absolument. C'est une bonne façon de le dire.

Michel Bitbol. Cela dit, il y a quand même une difficulté. Il n'est pas question de réfuter complètement la théorie dBB, c'est clair, mais cette théorie soulève (au moins) un problème philosophique. Dans cette théorie, la particule peut se voir attribuer deux statuts ontologiques

profondément distincts, pour ne pas dire incompatibles. Le premier statut, que Bohm avait voulu restaurer dans sa première théorie, c'est l'idée d'un petit corps qui se déplace avec une continuité dans sa trajectoire et une permanence dans son existence.

Le deuxième statut ontologique de la particule est celui d'un mode d'excitation du champ, qui est favorisé dans certains développements ultérieurs de la théorie de Bohm.

Cette dualité de statuts peut ne pas être perçue comme gênante par les bohmiens, mais il me semble qu'elle affaiblit leur affirmation initiale selon laquelle ils ont rétabli dans ses droits le concept classique de particule avec un parcours ininterrompu et une continuité spatio-temporelle.

Franck Laloë. Je le dirais un peu différemment. Si on fait de la théorie de Bohm, il faut associer les trajectoires aux particules habituelles. Mais si l'on fait de la théorie DBB des champs, à ce moment-là il faut admettre que le champ électromagnétique dans la cavité a une variable bohmiennne. Ce ne sera plus une position, ce sera un champ électrique, en l'occurrence. Il faut traiter cette variable bohmiennne de champ électrique correctement. Pourquoi les variables supplémentaires introduites se limiteraient-elles aux particules, avec exclusion des champs ?

Si on élargit le système quantique en restreignant les variables bohmiennes à une simple partie du système quantique, cela ne fonctionne pas. Ce n'est pas pertinent – et on sort de la logique de Bohm. Les mêmes incohérences se produisent en mécanique quantique standard si on traite classiquement une partie de l'expérience, mais quantiquement une autre.

Bernard d'Espagnat. La manière dont je comprends la remarque de Michel Bitbol est la suivante. Puisque nous parlons de la création de photons, nous sommes obligés de passer par le cadre de la théorie des champs. Faisons le donc complètement, c'est-à-dire prenons la théorie relativiste de Bohm dont vous allez nous parler dans quelques minutes, je crois, et oublions l'idée que les particules sont des petits corps. Il faut oublier cela et retenir, à la place, l'idée que les particules sont des quanta du champ.

Franck Laloë. Tout à fait. Si l'on prend une cavité, on n'attribue pas une position à chaque état de la cavité, mais une valeur du champ électrique.

Alain Aspect. On a donc perdu ce qui était « agréable », si j'ose dire, dans la vision initiale.

Bernard d'Espagnat. Oui, c'est cela. On a perdu ce qui était agréable. Et puis, indépendamment de toute question d'agrément, on a changé d'ontologie. On est passé d'une ontologie de petits corps à une ontologie de champs. S'agissant d'une théorie dont le trait le plus séduisant est d'être ontologiquement interprétable, c'est là une péripétie qui déconcerte ! A quand le prochain changement ? Qu'est-ce qui est réel ? En ce qui me concerne c'est sans doute cette bizarrerie qui alimente le plus mon scepticisme à l'égard de la théorie dont il s'agit. A moins qu'on ne puisse conserver à la fois la réalité intrinsèque des particules et celle du champ. Mais vu les phénomènes de création et d'annihilation c'est peut-être un peu difficile.

Alain Aspect. Je suis assez d'accord. Dans ce cas là, on pourra se demander si les descriptions sont réellement plus confortables que la théorie quantique habituelle.

Franck Laloë. Le fait que le mécanisme Welcher Weg soit dû à un champ ou une particule ne joue aucun rôle particulier dans cette expérience de pensée. Pour éviter d'opposer champs et particules, remplaçons le champ dans chaque cavité par une particule qui est déviée par le passage de la particule test ; on obtient ainsi un autre mécanisme qui permet de répéter l'argument à l'identique. Chaque particule supplémentaire possède alors évidemment une position bohmiennne, et alos exactement le même phénomène d'ondes vides se produit : les trajectoires

surréalistes disparaissent. Le fait qu'il s'agisse d'un champ ou d'une particule ne joue aucun rôle particulier. La seule chose qu'il ne faut pas faire est, si l'on introduit un objet quantique en théorie standard, le faire sans lui associer une variable bohmienne. Il faut être, soit pas bohmien du tout, soit totalement, mais pas à moitié.

Une autre remarque est que, en théorie standard, on prend toujours grand soin d'expliquer aux étudiants que le photon n'a pas de position. Le but de la théorie dBB n'a jamais été de ré-introduire une position pour toutes les particules, y compris le photon.

Jean-Michel Raimond. Pour l'instant, rien dans la position bohmienne n'est vraiment plus agréable que la mécanique quantique habituelle. L'expérience d'Englert, si j'ose dire, est d'une trivialité totale du point de vue de la physique quantique. C'est juste un aspect du « Welcher Weg », rien de plus. Alors que là, je suppose qu'il faut faire cinq pages de calculs pour trouver qu'une particule arrive à traverser l'axe. Je n'ai pas trouvé, jusqu'à présent, que ce soit plus confortable.

Franck Laloë : je pense, pour ma part, qu'il suffit de remarquer que le mécanisme des ondes vides intervient, ce qui ne demande aucun calcul particulier.

Alain Aspect. Il y a quand même un côté agréable et sympathique. S'il n'y avait pas le côté complication pour calculer les trajectoires que cite Michel Bitbol, après tout, nous serions prêts à oublier tout ce que dit la mécanique quantique. Nous considérerions que nous avons lancé une particule, qu'elle est passée d'un côté ou de l'autre, mais que de toute façon, elle sera guidée par des vallées et arrivera toujours sur des franges brillantes. Cela a un côté assez palpable, qui peut être attirant. Maintenant, s'il faut aller chercher des calculs au moins aussi compliqués que la mécanique quantique, on perd à coup sûr un côté agréable. Est-ce bien ce que vous avez voulu dire ?

Michel Bitbol. Tout à fait.

Suite de l'exposé

Les fonctions de corrélation temporelles

Franck Laloë. Je reviens un petit peu à l'atome d'hydrogène, même s'il faut que j'accélère par manque de temps. On considère un atome d'hydrogène ou, plus simple encore, un oscillateur harmonique à une dimension. Ses fonctions d'onde sont réelles, de sorte que la particule ne bouge pas en théorie de Bohm. Or la mécanique quantique standard prévoit que la fonction de corrélation de la position de la particule est une fonction oscillante du temps. N'y a-t-il pas contradiction ? De fait plusieurs papiers, dont celui de Correggi et Morchio, « *Quantum mechanics and stochastic mechanics for compatible observables at different times* », Ann. Phys. 296, 371-389 (2002), considèrent que la théorie dBB n'est pas équivalente à la mécanique quantique standard en ce qui concerne les fonctions de corrélation.

En fait, quand on calcule une corrélation en théorie dBB, il faut préciser que c'est une corrélation entre deux mesures. La première mesure introduit nécessairement des variables de position associées à l'appareil de mesure et introduit nécessairement le mécanisme des « ondes vides ». A partir de ce moment-là, la particule voit le fonctionnement et commence à se déplacer. Le résultat final est que les fonctions de corrélation sont exactement les mêmes en théorie dBB

qu'en mécanique quantique standard, mais il ne faut jamais oublier de prendre en compte l'effet de l'appareil de mesure.

Je voulais maintenant conclure, en changeant de registre, et expliquer pourquoi, à mon avis, cette théorie ne réalise pas vraiment le programme initial qu'on aurait pu lui attribuer. Ce que nous avons vu jusqu'à maintenant est que chaque difficulté rencontrée dans la mécanique bohmienne existe aussi dans la mécanique quantique standard. Je renvoie donc les deux points de vue un petit peu dos à dos, sans préférence. Ce qui reste essentiel est de demander à chacun, s'il prend un point de vue ou l'autre, de le faire de façon cohérente sans mélanger les deux.

Donc la question est maintenant : en théorie dBB, arrive-t-on à un point de vue plus satisfaisant où « les choses réelles sont les choses », et où la théorie est vraiment ontologiquement interprétable ? Je n'en suis pas si sûr que cela, pour finir.

Bernard d'Espagnat. Vous n'avez pas parlé de la généralisation relativiste, c'est-à-dire de la théorie bohmienne des champs. L'objection courante que l'on trouve dans des articles contre la théorie de Bohm, c'est qu'elle n'est pas relativiste. Mais en fait, vous m'avez signalé des articles dans lesquels on traite, mieux que ne l'avait fait Bohm en 1962, le problème des champs dans sa théorie. Vous m'avez même dit que dans cette théorie-là, on peut considérer soit que le champ magnétique est réel et, à ce moment-là, le champ électrique ne l'est pas, soit le contraire.

Franck Laloë. Comme l'heure passait, j'ai passé les derniers transparents pour arriver directement à la conclusion !

Bernard d'Espagnat. Il serait quand même bon d'en dire un mot, ne serait-ce que pour détromper les gens qui prétendent que la théorie dBB n'est pas susceptible de généralisation relativiste. Si je vous ai bien compris leur assertion n'est pas exacte.

4. Théorie des champs bohmienne

Franck Laloë. Disons donc quelques mots de la théorie dBB des champs. Je ne m'avancerai pas sur la théorie des champs en général, car je ne suis pas assez spécialiste. Ce qui est clair, c'est qu'on peut faire une théorie d'électromagnétisme en théorie de Bohm assez facilement, à condition d'accepter, comme je l'indiquais plus haut, d'introduire des variables supplémentaires associées aux champs.

Ce qui n'est pas très satisfaisant, ou du moins ne me satisfait pas beaucoup, c'est qu'à ce moment-là, on peut choisir ou le champ électrique E ou le champ magnétique B , sans raison bien convaincante de choisir l'un plutôt que l'autre. On voit bien que la position de la particule est privilégiée par rapport à l'impulsion, parce que c'est plus lié à l'espace que l'impulsion. En ce qui concerne E et B , ils jouent un rôle bien plus symétrique, faire un choix est un peu délicat. Mais on ne peut pas choisir les deux à la fois ; il faut privilégier l'un ou l'autre, ou alors une combinaison linéaire.

Alain Aspect. Oui, parce qu'on est obligé de prendre l'une des deux variables.

Franck Laloë. Oui, on peut prendre E comme équivalent de \mathbf{R} ou B comme équivalent de \mathbf{R} – mais pas les deux. Cela introduit une asymétrie entre les deux composantes du champ électromagnétique qui n'est pas très satisfaisante.

Bernard d'Espagnat. Mais enfin, quelqu'un qui veut vraiment une théorie ontologique, réaliste « pur sang » si je puis dire, peut malgré tout décider qu'il préfère une théorie comme celle-là, ou l'on choisit au hasard que c'est, disons, le champ électrique qui est réel, plutôt qu'une théorie limitée aux représentations humaines du réel. Car avec ce choix on a une description de la nature telle qu'elle est, et telle qu'elle serait même si nous n'avions jamais existé (puisque comme la physique classique, cette description ne fait aucune référence aux mesures, aux instruments, etc.) J'imagine qu'en tant que réaliste lucide, c'est-à-dire tenant à ce que sa théorie soit ontologiquement interprétable, quelqu'un comme John Bell aurait marché. qu'il aurait considéré qu'à défaut de mieux cette théorie lui convenait.

Franck Laloë. En tout cas, ce qui est important, quel que soit son choix personnel, c'est de ne pas dire que cette position réaliste est impossible. Nous savons qu'elle est possible. Certes, on peut ne pas l'aimer, c'est une question de goût, mais cette image existe et on peut la construire explicitement..

Bernard d'Espagnat. Si on la refuse ainsi que ses semblables et si l'on tient vraiment au formalisme de Schrödinger (formalisme relatif quantique non modifié), on n'arrive pas à retrouver le réalisme dont je parlais. C'est ce que John Bell a toujours dit, et je pense qu'en cela il avait raison.

5. Réserves. Deux niveaux de réalité dans la théorie dBB

Franck Laloë. Ce qui me semble encore un peu plus difficile, dans cette théorie, c'est qu'elle doit postuler qu'il est impossible d'effectuer préalablement une sélection au sein de la « distribution quantique ». Sinon, elle ne serait plus équivalente à la mécanique quantique standard.

Pire que cela, on peut montrer que sélectionner les variables supplémentaires conduirait à des situations où l'on pourrait transmettre des signaux plus rapides que la lumière. Là, c'est relativement catastrophique – à moins qu'on ne croie plus à la relativité ! C'est dans un article relativement récent de Valentini (*Phys. Lett. Vol. A 297, 273-78, 2002*).

Il faut donc vraiment postuler de façon fondamentale que ces variables de position supplémentaires sont et seront toujours complètement impossibles à présélectionner, à choisir, à manipuler.

Deux types de grandeurs

Pour finir, il existe deux types de grandeurs physiques dans ce nouvel univers réaliste de dBB. Les positions sont directement observables, mais pas directement manipulables. On voit, au passage, que les appeler « variables cachées » est absurde puisqu'il s'agit en fait des variables que l'on voit dans les expériences. Elles sont observables, mais il est interdit aux êtres humains de les manipuler, sinon il y aurait une contradiction avec la relativité.

En plus il existe un autre type de réalité, qui correspond aux fonctions d'ondes devenues des ondes pilotes bohmiennes. Ces ondes ne sont pas directement observables. On ne les voit que par l'intermédiaire de leur effet sur les positions. Mais, en revanche, elles sont manipulables : si on change le champ électrique, on change l'hamiltonien et on obtient une équation de Schrödinger qui indique comment va changer la fonction d'onde.

Au bout du compte, on avait voulu éliminer une dualité, mais on se retrouve avec une autre

dualité imposée par la cohérence de la théorie. Il existe deux niveaux de réalité, un niveau visible mais pas manipulable, et un autre niveau caché (visible indirectement) qui est celui qu'on manipule dans les expériences. Je trouve donc personnellement, d'une certaine façon, que le programme d'unification et de simplification de la théorie dBB n'est pas rempli jusqu'au bout, et perd de ce fait une partie de son intérêt

Alain Aspect. Voulez-vous dire que cela ressemble finalement beaucoup à la physique quantique que nous connaissons ?

Franck Laloë. C'est un peu la conclusion pessimiste à laquelle j'arrive.

Jean-Pierre Gazeau. J'ai une question technique. En fait, on aurait pu partir de l'équation de Schrödinger pour des fonctions d'onde dépendant de la quantité de mouvement et du temps. N'aurait-on pas pu suivre le même chemin, en introduisant une quantité de mouvement, qui jouerait le rôle de la position R , avec le champ suivant qui se combine de sorte que dès qu'un champ pose problème, un autre est là pour le résoudre et réciproquement ?

Franck Laloë. On peut certes développer une théorie symétrique de dBB, mais fondée sur les impulsions au lieu des positions.

Jean-Pierre Gazeau. Voilà.

Franck Laloë. Mais si l'on veut avoir position *et* impulsion, alors un problème se pose... Il faut choisir.

En conclusion, cette théorie est-elle plus simple conceptuellement que la mécanique quantique conventionnelle ? La réponse est un peu une question de goût personnel. Je ne sais pas y répondre.

On s'aperçoit que de très nombreuses composantes de la théorie dBB sont communes avec la mécanique quantique standard. Une chose est sûre, le mécanisme des ondes « vides » est magnifique. Il relie décohérence et unicité. C'est extraordinaire ! Cela étant, hélas, le programme n'est pas rempli jusqu'au bout.

En tout cas, cette théorie apporte un point de vue alternatif extrêmement utile. Par exemple, sans elle, il n'y aurait pas eu le théorème de Bell et il y aurait de nombreux aspects de la mécanique quantique que nous ne connaîtrions pas.

Bernard d'Espagnat. Oui c'est tout à fait vrai. En effet, Bell a d'abord démontré que le théorème de von Neumann ne s'appliquait pas. Qu'il pouvait y avoir des variables cachées, ce qui l'a conforté dans son intérêt à l'égard de la théorie de Bohm. Mais ensuite, il a étudié cette théorie et constaté ce dont nous parlions tout à l'heure dans le cas d'un système de deux particules, à savoir qu'il y avait alors non localité. C'est-à-dire qu'il a constaté que la deuxième particule n'obéissait plus à sa propre variable cachée, mais obéissait à ce qui était arrivé « très loin là bas » à la première particule. C'est dans le cadre de la théorie de Bohm qu'il a trouvé cela. Et cela l'a incité à se demander, si c'était une « vacherie » de la théorie de Bohm ou si c'était général. Il a étudié la question et il a découvert que c'était général.

Alain Aspect. J'avais une vision complètement fautive du déroulement des choses. Je pensais que c'était dans l'autre sens, c'est-à-dire qu'il avait d'abord trouvé ses inégalités puis qu'il s'était interrogé sur la théorie de Bohm.

Franck Laloë. Dans une note de bas de page d'un autre article, sur la réfutation de von Neumann, il précise que si l'on calcule la dynamique de la deuxième particule, on trouve exactement ce qu'a indiqué Bernard d'Espagnat. Il serait intéressant de savoir s'il avait en tête son théorème à ce moment-là, pour approcher la question de la non localité*.

Alain Aspect. Je réétudierais ce point dans ce sens.

Bernard d'Espagnat. Cela n'a pas une importance capitale, mais c'est intéressant quand même.

Alain Aspect. C'est historique.

* (note ajoutée par l'éditeur) Dans l'article ci-dessus mentionné concernant le théorème de von Neumann (article écrit avant celui de 1964 sur EPR mais paru seulement après) Bell démontre la non localité de la théorie de Bohm mais ajoute que l'on ne sait pas encore si le phénomène est généralisable à toute théorie à variables cachées. Et dans la note ici mentionnée par Franck Laloë (et manifestement ajoutée sur épreuves) il ajoute que maintenant on sait que tel est le cas et donne la référence à son article sur EPR. Cela donne, en tout cas, fortement à penser que c'est bien l'étude de la théorie de Bohm qui l'a mis sur la piste de sa découverte et non pas l'inverse (BE).

DÉBAT

Hervé Zwirn. Pour reprendre la conclusion et aborder le problème sous l'angle de l'avantage ou de l'intérêt qu'on peut y trouver, je crois qu'il existe deux aspects que les gens qui préfèrent adopter cette théorie mettent en avant. Il est clair que la théorie de Bohm ne permet pas de rétablir un réalisme classique habituel. Je crois que maintenant, tout le monde est d'accord pour abandonner définitivement le réalisme de la mécanique classique, habituelle. Ne serait-ce que parce que la non localité est effective, que la contextualité intervient et qu'on peut donc abandonner tout espoir de rétablir la réalité au sens intuitif du terme.

Les deux avantages que ses défenseurs mettent en avant sont tout d'abord le fait qu'au-delà de la nécessité d'élargir le réalisme à la non localité et à la contextualité, il est possible d'exprimer cette théorie sans faire référence à aucun observateur – ce que ne permet pas la mécanique quantique. La première chose consisterait donc à dire que grâce à la théorie de Bohm, nous pouvons rester réalistes (dans un sens un peu différent du réalisme classique) puisque nous pouvons nous passer de l'observateur.

Le deuxième avantage qu'ils mettent en avant est le déterminisme. Pour les défenseurs de la théorie de Bohm, cette dernière est déterministe tandis que la mécanique quantique ne l'est pas. En effet, l'abandon du principe de réduction du paquet d'onde...

Jean-Michel Raimond. Est-elle déterministe, quand on se donne une distribution de probabilités initiale ?

Hervé Zwirn. *Modulo* cette distribution !

Jean-Michel Raimond. Franck Laloë a beaucoup insisté sur le fait qu'il ne fallait pas oublier ce point.

Hervé Zwirn. Bien sûr. C'est une distribution initiale. Il faut la regarder comme cela. Je ne suis pas un défenseur de la théorie dBB. Mais une fois donné cette distribution initiale, les défenseurs peuvent considérer que tout est déterministe. Elle ne permet évidemment pas de prédire les choses mais, sur le plan conceptuel, cette théorie leur semble plus satisfaisante que la mécanique quantique où il y a quand même un indéterminisme essentiel que l'on ne parvient pas à éliminer.

Jean-Michel Raimond. Il joue aux dés le début au lieu d'y jouer pendant l'expérience.

Hervé Zwirn. Dieu n'y joue qu'une fois, alors qu'en mécanique quantique, il y joue tout le temps !

Edouard Brézin. Vous avez raison. On conserve quand même une notion, fondamentale en mécanique quantique, qui se retrouve dans la distribution initiale : contrairement à tout ce qu'on a connu jusque-là, l'introduction des probabilités est irréductible. Ce n'est pas une commodité due à la complexité. Par exemple, à ce que je sais, on peut faire du calcul des probabilités sur de l'hydrodynamique, sur un système compliqué, mais nous ne doutons pas qu'on pourrait le remplacer par une dynamique complexe embêtante à résoudre et dont on n'a pas besoin. De la même façon, le fait d'introduire des probabilités dans le lancement d'un dé n'est qu'une commodité de calcul, sans être une nécessité. En mécanique quantique, c'est une nécessité qui subsiste dans le formalisme qui vient d'être décrit.

Bernard d'Espagnat. Elle subsiste en quoi ?

Edouard Brézin. Elle subsiste en ce sens qu'il n'existe aucune méthode pour réduire ou éliminer la notion de probabilité et la remplacer par une notion complexe dans laquelle on introduit des variables. Je reprends la différence entre la mécanique quantique et le lancement du dé : dans le lancement du dé, nous ne doutons pas qu'on pourrait remplacer le $1/6^{\text{ème}}$ par une description de l'ensemble des degrés de liberté impliqués dans lequel on décrirait correctement l'impulsion de la pièce jetée, le nombre de fois où elle va tourner dans l'air et son choc sur la table. Cela permettrait de résoudre les équations du mouvement. Nous ne le faisons pas parce que nous n'en avons pas besoin. On peut donc classiquement éliminer le calcul des probabilités. Il n'y a qu'en mécanique quantique qu'il n'est pas éliminable. Il est fondamental et irréductible. Cela subsiste.

Bernard d'Espagnat. Je dirais que s'il n'est pas éliminable en mécanique quantique, un bohémien, croyant aux variables « cachées », répondrait sans doute que c'est simplement dû à nos incapacités humaines. Nous ne sommes pas suffisamment calés pour y arriver. Mais un « super physicien » qui aurait accès à ces variables pourrait utiliser la mécanique de Bohm pour, dans tous les cas de figure, prédire avec certitude ce qui sera observé. Nous, nous ne les connaissons pas, parce que nous sommes des « grosses bêtes » pas suffisamment fines pour parvenir à saisir ces variables cachées. Mais elles existent. On pourrait imaginer un démon de Laplace qui serait capable de les connaître.

Edouard Brézin. J'ai le sentiment que non.

Bernard d'Espagnat. Je ne veux tout de même pas aller trop loin. Vous avez bien raison de souligner l'importance du problème de la probabilité initiale. En théorie dBB, même un démon de Laplace, connaissant les valeurs des variables cachées, échouerait prédire le futur avec certitude si par malheur il « tombait » sur un univers dans lequel la distribution initiale ne serait par celle définie par le module au carré de la fonction d'onde de cet univers.

Edouard Brézin. C'est irréductible. C'est d'ailleurs en ce sens que je ne crois pas qu'on puisse réaliser ce que vous venez de dire, c'est-à-dire un être bien plus fort que nous le serions, qui aurait un ordinateur infini, qui remplacerait le calcul des probabilités par un calcul non probabiliste – ce qu'on peut faire avec une pièce de monnaie, mais qu'on ne peut pas faire avec un système quantique, ni même avec le système de Bohm.

Bernard d'Espagnat. S'il connaissait les variables cachées...

Hervé Zwirn. Il y a une différence, quand même. Ce qui reste de probabiliste dans la théorie de Bohm, c'est l'état initial. En revanche, une fois qu'on a l'état initial, c'est déterministe. Donc si, comme le dit Bernard d'Espagnat, on connaissait l'état initial, on pourrait en principe tout calculer. C'est d'ailleurs un peu la même chose avec le dé. L'état initial du dé devrait être connu infiniment précisément compte tenu de la sensibilité aux conditions initiales pour qu'on arrive à prédire.

Cela dit, il existe quand même une différence significative entre la mécanique quantique et la théorie de Bohm. En dehors de cet état initial qui reste probabiliste en théorie de Bohm, toute la suite du processus reste déterministe. Alors qu'en mécanique quantique, c'est indéterministe à tout moment. C'est tout de même une différence importante.

Alain Aspect. Que voulez-vous dire par là ?

Hervé Zwirn. Quelle que soit la connaissance précise qu'on a de l'état du système en mécanique quantique, état décrit par la fonction d'onde (et on pense qu'il n'y a rien d'autre), il y a, pour chaque mesure, un indéterminisme qu'on ne peut pas éliminer. Alors qu'en théorie de Bohm, l'indéterminisme est lié au fait qu'on ne peut pas connaître la distribution initiale. Mais, à distribution initiale donnée, il n'y a plus d'indéterminisme. Tout est déterministe.

Si on dit que l'indéterminisme est lié au fait de ne pas connaître l'état final lorsqu'on connaît l'état initial – ce qu'on peut définir comme étant l'indéterminisme essentiel (on connaît l'état initial, on fait une mesure et on ne peut pas prédire l'état final) – alors la mécanique quantique est essentiellement indéterministe et pas la théorie de Bohm.

Jean-Michel Raimond. C'est partiellement vrai, parce que chaque fois qu'on introduit un nouvel appareil de mesure, il faut aussi introduire sa distribution de probabilité et de ses positions. Chaque mesure ajoute une couche d'indéterminisme.

Edouard Brézin. Je suis d'accord.

Jean-Michel Raimond. C'est simplement pousser la probabilité au début du calcul au lieu de l'avoir à la fin, mais à mon avis, c'est exactement conceptuellement identique. Chaque fois qu'on ajoute un appareil de mesure, il a sa distribution de probabilité.

Hervé Zwirn. Je suis d'accord. C'est vrai. Mais on peut aller un cran plus loin et considérer que si nous n'arrivons pas à prédire le résultat en théorie bohémienne, ce n'est pas parce que le processus est intrinsèquement indéterministe, mais parce qu'il nous est impossible de connaître l'état initial précisément. Alors qu'en mécanique quantique, la position est un peu différente : on connaît l'état initial aussi précisément qu'il est possible de le connaître, puisqu'il n'y a rien d'autre, mais malgré cela, on ne peut pas prédire l'état final.

Jean-Michel Raimond. Je renonce au déterminisme, mais je peux le faire d'une manière différente. Nous sommes d'accord. Je ne me sens pas plus confortable avec la théorie de Bohm !

Hervé Zwirn. Il est vrai que nous ne sommes pas beaucoup plus avancés !

Alain Aspect. Je voudrais vous faire remarquer que quelqu'un comme Nicolas Gisin dirait que ça change quand même quelque chose sur ses générateurs d'un nombre aléatoire quantiques. La sécurité repose sur l'idée que c'est fondamentalement indéterministe puisque quantique alors que tous les algorithmes, si compliqués et sensibles aux conditions initiales soient-ils, mais qui ont une vision déterministe au sens où vous la décrivez, pourraient, en principe, être cassés un jour.

Jean-Michel Raimond. Non, puisqu'on ne peut pas déterminer la distribution initiale, sans quoi on violerait la causalité relativiste .

Alain Aspect. ...j'avais oublié qu'on pouvait communiquer plus vite que la lumière !

Bernard d'Espagnat. Cette discussion sur le déterminisme que nous venons d'avoir était certes intéressante. Mais à mon sens l'intérêt principal de la théorie de Bohm ne se trouve pas dans le fait – effectivement discutable, vous avez raison de le souligner – qu'elle restaure, ou restaurerait le déterminisme mais bien, je le répète, dans le fait, incontestable, celui-là, qu'elle récupère le réalisme sous sa forme forte, traditionnelle. De fait, je n'ai pas encore bien saisi les raisons pour lesquelles des physiciens qui se proclament et se considèrent comme réalistes (et je crois que c'est la majorité parmi nous) ne suivent pas John Bell dans son idée que la mécanique quantique n'est pas satisfaisante à cet égard et que, par conséquent, pour eux le dernier recours semble être la théorie de dBB ou une théorie similaire. J'aimerais saisir mieux ces raisons. Je me dis par conséquent qu'il serait sympathique et surtout très intéressant d'avoir un échange de vues là dessus.

Mais je ne veux pas imposer mon point de vue et j'aimerais savoir ce que vous en pensez. Michel Bitbol, vous avez des arguments assez forts contre la théorie de Bohm, mais nous savons que vous n'êtes pas réaliste.

Michel Bitbol. Effectivement. Pour commencer, il n'y a guère d'arguments contre la capacité de la théorie dBB à rendre raison de tous les phénomènes prévus par la mécanique quantique standard. Je crois que nous sommes tous d'accord sur ce point : il n'y a pas moyen de mettre la théorie de Bohm en défaut dans sa concordance prévisionnelle avec la mécanique quantique standard. Mais on peut avancer quelques arguments philosophiques. Franck Laloë en a donné de très bons. On peut en ajouter encore. C'est le seul point sur lequel je pense éventuellement pouvoir intervenir la prochaine fois, lors d'une discussion sur la théorie de Bohm.

Alain Aspect. Si mon emploi du temps me permet d'y assister, j'y viendrai. Mais j'ai envie, d'emblée, d'un peu réfuter la fin de votre affirmation. Si on est réaliste et que l'on suit John Bell dans le fait qu'il est mal à l'aise avec la physique quantique que nous connaissons, on n'est pas obligé de conclure pour autant que la seule « issue de secours », si j'ose dire, est la théorie dBB. On peut rêver qu'il y en ait d'autres. Il n'y a aucune démonstration du fait que c'est la seule possible.

Bernard d'Espagnat. C'est vrai.

Franck Laloë. Il y en a d'autres, en particulier donnée par les théories à dynamique de Schrödinger modifiée et stochastique (GRW et Pearle).

Alain Aspect. On peut donc se proclamer réaliste et considérer que cette théorie, qui a peut-être donné des bâtons pour se faire battre en étant trop précise et en permettant de creuser en détail, n'est finalement pas très agréable. Cela n'implique pas, pour autant, qu'on renonce à être réaliste.

Bernard d'Espagnat. C'est vrai. C'est un point de vue très raisonnable. D'ailleurs, il y a d'autres théories ontologiquement interprétables, telles, effectivement, les théories à équation de Schrödinger modifiées mentionnées par Franck, qui sont très intéressantes.

Jean-Pierre Gazeau. En ajoutant du non linéaire ?

Franck Laloë. Ou/et du bruit. C'est un autre point de vue où le monde est décrit par la fonction d'onde qui est réelle.

Edouard Brézin. Qu'en est-il de la théorie, que je ne connais pas, de Gell-Mann et Hartle, reprise par Roland Omnès?

Bernard d'Espagnat. Nous sommes un certain nombre à lui avoir fait quelques objections. Elle est donc moins séduisante maintenant qu'elle n'a été à ses tous débuts. Eventuellement, nous pourrions en discuter aussi.

Lena Soler. Je vous écoute depuis le début avec un point de vue un petit peu extérieur, puisque j'ai une formation de physicienne au départ, mais qui est lointaine. Je me suis ensuite orientée vers la philosophie. Vous dites « ce n'est pas très agréable », « ce n'est pas très confortable »... Je pense qu'il s'agit de sentiments qu'on ne peut connaître que lorsqu'on a été entraîné, d'une certaine manière. Je me demande dans quelle mesure ce type de sentiment n'est pas fortement façonné par l'éducation scientifique, donc par la circonstance que cette théorie de Bohm est complètement occultée dans l'éducation scientifique. Je suis d'ailleurs surprise de constater qu'alors que vous êtes tous des physiciens extrêmement expérimentés, vous découvrez certains aspects de cette théorie.

Je me demande s'il n'y aurait pas intérêt à s'interroger aussi sur ce facteur-là. A cet égard, je voudrais vous signaler un livre de James Cushing publié en 1994, intitulé *Quantum Mechanics : historical contingency and the Copenhagen hegemony*. Le livre développe les principaux arguments que l'on peut apporter en faveur de la théorie de Bohm, et avance aussi une

thèse sur les facteurs contingents historiques qui ont eu pour effet que cette théorie est largement irrecevable aujourd'hui et rejetée par les physiciens. Si nous poursuivions cette discussion, ce qui m'intéresserait beaucoup, ce serait un livre à considérer.

Jean-Michel Raimond. Je ne pense pas qu'on rejette cette théorie. On la connaît mal, c'est vrai. Mais ce qu'on regarde surtout quand on dit qu'une théorie est agréable ou pas agréable, c'est si elle a un contenu philosophique différent. Apparemment, si on met la probabilité initiale, il n'est pas évident qu'on gagne dans le déterminisme ce qu'on avait perdu. On regarde aussi si elle permet d'obtenir de manière plus compacte le résultat qu'on cherche. Cela, j'ai l'impression que c'est franchement faux.

Alain Aspect. Je nuancerais un peu. Je suis assez d'accord avec vous sur le fait que les objections que vous semblez élever contre les gens qui n'aiment pas la théorie de Bohm sont assez irrecevables s'il s'agit de dire que les gens sont « bornés ».

Lena Soler. Ce n'est pas ce que j'ai dit !

Alain Aspect. Je crois que tout physicien est prêt à accepter de nouvelles théories qui vont au-delà de la doxa habituelle. Le cas idéal est celui où elle prédit quelque chose de nouveau. Mais même si elle ne fait pas cela, on lui demande au moins d'offrir un schéma intellectuel qui permet d'être un peu créatif, c'est-à-dire d'imaginer des situations nouvelles intéressantes. Jusqu'à présent, je ne vois pas grand-chose, dans la théorie de Bohm, qui nous stimule beaucoup.

Je pense que nous sommes un certain nombre, en particulier autour de cette table, à avoir regardé avec une certaine sympathie la théorie de Bohm. Mais à partir du moment où elle ne me stimule en rien... A titre personnel, ce qui me stimule le plus serait une vision réaliste naïve de la fonction d'onde. On demande quand même à un nouveau schéma interprétatif de stimuler notre imagination.

Edouard Brézin. Il y a un autre point, quand même. Pardonnez-moi si je change de sujet, mais nous sommes quand même à un moment qui est terriblement loin d'être terminé, où l'espace et le temps sont, pour un certain nombre de nos collègues, des concepts émergents – de la même façon que la température est un concept émergent qui n'a pas de signification microscopique intrinsèque.

Dans un tel schéma, où nous serions dans cette position, il est peut-être présomptueux d'imaginer qu'on va pouvoir résoudre les problèmes conceptuels que nous avons au niveau d'une mécanique quantique qui ignore totalement ces inconnues sous-jacentes de manière intrinsèque. Autrement dit, je ne sais pas si je suis réaliste ou non réaliste, mais je suis volontiers prêt à abandonner le réalisme pour une ignorance qui ne permet pas de répondre à cette question à l'heure actuelle. Je la crois prématurée. Nous sommes devant la mécanique quantique comme le 19^{ème} siècle devant la thermodynamique. Nous en sommes toujours à chercher une dynamique sous-jacente qui est loin d'être comprise. Cela peut changer très profondément notre vision de l'espace et du temps et, probablement, de la mécanique quantique. Je ne sais pas si cela répondra à notre désir de réalisme, puisque nous en avons tous le désir, mais en tout cas, cela me paraît prématuré.

Michel Bitbol. C'est exactement la position qu'avait adopté Bohm à la fin de sa vie. Il disait que l'espace et le temps étaient eux-mêmes un processus émergent, et qu'il fallait imaginer

une dynamique sub-spatiotemporelle comme niveau de base de cette émergence. Ce qu'il avait initialement considéré comme de vraies trajectoires spatio-temporelles de particules ne représentait plus pour lui, à la fin de sa vie, qu'un ordre explicite, visible, tangible, déployé comme une apparence superficielle à partir de l'ordre implicite *non* spatio-temporel. En d'autres termes, la trajectoire n'était plus pour lui que le faux-semblant spatio-temporel d'un ordre algébrique sous-jacent. Il est amusant de voir à quel point ces idées contemporaines étaient aussi dans l'esprit de Bohm.

Edouard Brézin. Il est clair que si, à l'échelle de la longueur de Planck, il y a des fluctuations de la caractéristique d'Euler-Poincaré de l'espace-temps, par exemple, on a du mal à parler de l'espace temps de manière aussi rigide que ce que nous faisons en mécanique quantique ordinaire. Je pense donc que la question est prématurée.

Alain Aspect. Pour revenir au débat sur Bohm et à la raison pour laquelle les physiciens se sont intéressés ou pas à lui, je voudrais revenir sur l'erreur chronologique dans laquelle, tout à l'heure, j'ai reconnu être un moment tombé, et qui indique quelque chose de profond me semblait-il. Quand un article aussi simple que celui de John Bell met le doigt sur quelque chose d'étonnant dans la physique quantique habituelle, finalement, au bout d'un certain temps, la plupart des physiciens finissent par comprendre, parce que c'est très simple. Le théorème de Bell est très simple. Il met le doigt sur quelque chose d'assez extraordinaire dans la physique quantique. Du coup, il y a même des gens comme Arthur Ekert et d'autres qui inventent des applications, des cryptographies quantiques etc.

Finalement, ce papier est extrêmement simple. Il ne fait pas appel à toute la machinerie de Bohm. Donc, si vous voulez, aller chercher tout ce « machin », qui a l'air quand même très compliqué, pour arriver à la conclusion qu'on n'avait peut-être pas réalisé - d'ailleurs Feynman lui-même non plus ! - que l'intrication était en fait un peu plus compliquée que la dualité en deux particules pour une particule unique etc... Finalement, Bell nous a apporté une façon simple de le réaliser.

Ce qui était salutaire, je pense, dans tout cet ensemble de discussion, c'était de dire que la mécanique quantique est encore plus choquante qu'on ne le pensait. Peut-être que s'il n'y avait pas eu Bell avec son théorème si simple, la théorie de Bohm aurait été plus salutaire pour mettre le doigt sur le fait que la mécanique quantique standard est quand même encore plus bouleversante que ce qu'on pouvait penser à un certain moment, après le microscope de Heisenberg, par exemple.

Je dirais que dans la mesure où on a ce théorème de Bell qui est si simple, il est un peu lourd d'aller se convaincre... A la fin, que nous apporte la théorie de Bohm ? Elle nous apporte le fait qu'essayer de se faire des représentations en mécanique quantique est encore plus dur que ce que l'on croyait.

Jean-Pierre Gazeau. Je crois qu'il y a quand même une question d'éducation. Nous sommes éduqués dans la mécanique quantique traditionnelle. La mécanique quantique de Bohm, nous ne la connaissons pas. Pour ma part, je l'avais déjà vue quelque part, mais elle ne m'intéressait pas vraiment. Jusqu'ici, je n'avais pas envie, par paresse, d'approfondir. Mais, apparemment, il n'y a pas de contradiction entre les deux approches.

Alain Aspect. C'est exactement ce que je viens de dire. Cela permet d'essayer de réaliser que la mécanique quantique standard, si on cherche à donner des interprétations, est

extraordinairement tordue. Mais, finalement, c'est une démarche bien compliquée pour arriver à cette conclusion.

Jean-Pierre Gazeau. Feynman, par exemple, considérait qu'il fallait étudier toutes les voies d'accès possibles. Il se peut que cette approche, pour certains problèmes, apporte quelque chose de plus.

Alain Aspect. Il y a l'histoire, quand même. Certains physiciens, et non des moindres, ont essayé de travailler la théorie de Bohm. Il n'y a pas que de mauvais physiciens qui ont essayé de le faire.

Jean-Pierre Gazeau. Prenons la mécanique classique. Parfois, le point de vue lagrangien est absolument impossible pour traiter certains problèmes. Il en est de même du point de vue hamiltonien. Mais chacune de ces deux mécaniques peut apporter des points de vue nouveaux et équivalents jusqu'à certains points.

Alain Aspect. A ma connaissance, nous n'avons aucun exemple de cela avec la théorie de Bohm. Pourtant, des physiciens non négligeables ont essayé.

Edouard Brézin. Il me semble que la mécanique classique est fondamentalement paradoxale et non causale. En effet, elle résulte d'un principe de moindre action. Dans ce principe, pour trouver la trajectoire, il faut supposer que la lumière, par exemple, sait de quel point elle part et jusqu'à quel autre elle veut aller. C'est absolument ahurissant. La lumière, quand elle se propage, ne sait pas à quel point elle veut aller. Pourtant, sa trajectoire résulte bien d'un principe de moindre action. Elle est non causale et cette non causalité est expliquée pour la première fois par la mécanique quantique, qui nous dit qu'elle va partout et que ce que nous voyons est l'effet de toutes ses interférences et toutes ses trajectoires. Au bout du compte, nous avons l'illusion d'une seule trajectoire à l'échelle macroscopique. Donc la mécanique quantique résout un problème ahurissant de la mécanique classique qui ne troublait personne, jusqu'à Feynman ou jusqu'à nous, qui était la non causalité ahurissante.

Est-ce que, dans le point de vue de Bohm, on retombe sur une causalité, en bazardant du même coup ce qui faisait quand même l'un des grands succès de la mécanique quantique qui était d'expliquer pourquoi le monde nous apparaît comme causal ?

Alain Aspect. Je suis assez troublé par ce que vous venez de dire. De deux choses l'une. Ou l'on parle d'ondes quantiques qui décrivent une particule unique et ce que vous dites est juste. Ou bien l'on parle de la lumière et là il n'y a aucun problème puisqu'on n'est pas obligé d'avoir recours au principe de moindre action. On peut avoir des équations locales, qui sont des équations de Maxwell, des équations différentielles locales, et le champ se propage de proche en proche.

Edouard Brézin. C'est ce qu'on dit d'habitude : dans l'équation de Newton, il suffit de connaître la position et la vitesse pour calculer l'exécution de la fameuse loi du principe de moindre action. Mais ce n'est pas tout à fait vrai.

Alain Aspect. Ce n'est pas vrai ?

Edouard Brézin. Pas tout à fait, car la vitesse est une dérivée (ce qui est vrai pour les équations de Maxwell), ce qui implique quand même un accroissement du temps infinitésimal. Je ne suis donc pas sûr que cette non causalité du principe de moindre action ne soit pas réellement présente aussi bien dans les équations de Newton que dans celles de Maxwell. En revanche, elle disparaît complètement lorsqu'on passe à la mécanique quantique, comme l'a magnifiquement montré Feynman, en particulier dans ce petit essai intitulé *Q.E.D*, qui est une merveille. Il explique pourquoi et comment ce problème de la non causalité ahurissant classique est résolu par la mécanique quantique.

Bernard d'Espagnat. Cette dernière partie de notre débat est bien intéressante et montre qu'il y a effectivement de quoi poursuivre notre discussion. Mais il est tard et nous devons nous arrêter. Nous consacrerons donc la prochaine séance à cette même théorie dBB et, en particulier, aux questions que vous venez d'aborder et qui méritent d'être étudiées plus à fond.

Alain Aspect. Nous remercions et félicitons Franck Laloë !