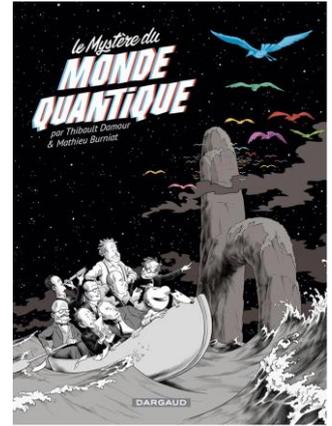


Présentation de la BD intitulée : *Le mystère du monde quantique*

Thibaud Damour & Mathieu Burniat
(Dargaud 2016)

La présentation a lieu à l'Institut Henri Poincaré (IHP) par Thibaud Damour et Mathieu Burniat devant un amphi comble. Thibaud Damour fait cette présentation orale pendant que Mathieu Burniat, aux manettes, réalise dessins et schémas pour illustrer ses propos.



Le conférencier Thibaud Damour, au centre, est présenté avec Mathieu Burniat, à droite, par Jean Paul Uzan, directeur adjoint de l'Institut Henri Poincaré

Pour commencer, je voudrais dire que c'est pour moi une émotion particulière d'être ici, à l'IHP, parce que c'est l'endroit où Louis de Broglie a travaillé pendant longtemps ; son bureau était situé juste au-dessus de nos têtes. C'est aussi un honneur d'avoir dans la salle des collègues scientifiques, en particulier Claude Cohen Tannoudji, Alain Aspect, Serge Haroche et Albert Fert et beaucoup d'autres collègues. Nous avons aussi des « lumières » de la BD puisque nous avons le plaisir d'avoir Marion Montaigne et beaucoup d'autres.

La physique quantique est partout autour de nous

Le mystère du monde quantique c'est quoi ? La physique quantique est dans le Soleil par exemple ; la lumière-énergie du Soleil vient de phénomènes quantiques intimes, y compris les effets tunnels, des effets fortement non classiques et d'autres effets de transmutation de particules. La physique quantique est non seulement dans la nature, dans le Soleil, dans un feu de braises, mais elle est aussi dans les chaises sur lesquelles nous sommes assis. Le fait que les chaises résistent, le contact entre les corps solides, est en fait un phénomène quantique dû aux orbitales atomiques. C'est quelque chose qui a commencé à être compris après la découverte de la mécanique quantique.

Plus prégnant encore, toute la chimie est fondée sur la physique quantique, en particulier le phénomène essentiel de transmission des gènes, transmission des caractères génétiques. Le fait de la stabilité de la vie est dû aux stabilités quantiques des molécules de la vie à commencer par l'ADN et l'ARN.

Et puis, si vous écoutez un CD ou regardez un DVD, vous pouvez penser que le phénomène du « laser » utilisé a été conçu par Einstein dans un de ses travaux importants, qui joue d'ailleurs un rôle dans la BD. Il a introduit des idées fondamentales dans l'interaction entre la lumière et la matière, c'est un sujet particulièrement important ici en France et dans le laboratoire LKB à côté d'ici.

Le mystère quantique, pour tout le monde y compris les physiciens, c'est le décalage entre la prégnance, l'omniprésence de la physique quantique dans la réalité du monde qui nous entoure, et le manque de consensus à la fois historique et jusqu'à présent sur la façon dont il faut penser la physique quantique ; on y viendra tout de suite après.

Ondes / particules

J'aimerais d'abord exposer très rapidement pour les non experts, l'introduction à un phénomène essentiel de la physique quantique qui est le caractère ondulatoire de la matière. Pour cela rappelons-nous ce que c'est qu'une onde.

Considérez, venant de la mer, une houle marine qui vient de loin et qui passe à travers deux trous proches dans une digue. Cette houle est très régulière, ce sont des ondes qui sont le long de lignes droites ; quand elles passent à travers ces deux trous, chaque trou réémet des ondes sous forme d'ondelettes circulaires. Ces ondelettes se recombinent en créant des zones où elles s'ajoutent et d'autres zones où elles se retranchent. Ce phénomène d'*interférences* avait été observé vers 1830 à la fois en Angleterre par Young et en France par Fresnel qui a développé la théorie ondulatoire de la lumière. Ce fut la preuve pendant tout le XX^{ème} siècle du caractère ondulatoire de la lumière.

Plus tard, suite à une idée géniale de Louis de Broglie, il a été vérifié expérimentalement qu'une particule comme un électron pouvait également donner naissance à des phénomènes d'interférences. Considérez un canon à électron qui émet des électrons, un par un, devant deux fentes proches. Si on dit que l'électron est une particule, l'électron devrait passer soit par la fente de gauche soit par la fente de droite. S'il passe par la fente de gauche, le fait que la fente de droite existe ne devrait jouer aucun rôle, disons que sur l'écran plus loin, on devrait voir une espèce de grosse tâche qui serait, si l'on peut dire, « l'ombre de la fente de gauche ; de même derrière la fente de droite une autre grosse tâche qui serait « l'ombre » de la fente de droite, mais sans interférences entre les deux. L'aspect particulaire de l'électron est lié au fait que l'électron donne à chaque fois un impact sur l'écran situé plus loin ; l'électron arrive comme une particule, c'est une particule.

Mais on constate aussi un aspect aléatoire en ce sens que l'électron arrive tantôt à un endroit tantôt à un autre et rien dans le dispositif de l'appareil ne permet de prédire à priori exactement où il va arriver ! Si vous attendez, tous les impacts sur l'écran des électrons émis par le canon s'organisent en franges d'interférences ; ils reconstituent ce qui était la caractéristique du caractère ondulatoire de la lumière.



Il est donc « plus probable » que les impacts des électrons s'alignent selon des franges d'interférences. Il y a là un mystère quantique puisque du coup, le fait que deux fentes soient ouvertes joue un rôle, quelque chose de non local.

Il y a un objet qui est une particule mais en même temps sa probabilité de faire un impact sur un certain endroit de l'écran est liée à quelque chose qui est une onde.

L'histoire des interprétations des propriétés d'un objet quantique

Quelles ont été les interprétations historiques du comportement mystérieux d'un objet quantique comme l'électron ? Schrödinger a introduit pour la première fois une équation décrivant une onde. Il a pensé pendant un moment que du coup on pouvait éliminer l'idée que les objets quantiques étaient des particules, ils étaient finalement des ondes. Il n'y aurait que des ondes ; les ondes peuvent former des paquets qui sont plus ou moins localisés. Il s'est aperçu assez rapidement que cette onde avait des propriétés bizarres, que sa localisation n'était pas stable, que l'onde était dans un espace beaucoup plus grand que l'espace à trois dimensions.

Assez rapidement Max Born est arrivé en disant non, non, non, ça ne suffit pas, en fait il faut combiner deux choses : d'abord il y a des éléments aléatoires donc il y a des probabilités, il y a une probabilité des particules ; plus précisément, le mouvement des particules -comme il l'a écrit- suit des lois de probabilité mais cette probabilité elle-même se propage selon une loi de causalité. Il voulait dire que la probabilité était donnée par le carré de l'amplitude d'une onde qui, elle, se propage, décrite par une équation d'onde.

Finalement Born a introduit les deux aspects et il s'est posé la question : c'est une particule ? C'est une onde ? C'est quoi, ce dont on parle ?

Après une discussion avec Einstein, Heisenberg considère finalement que c'est le formalisme de la mécanique quantique qui va nous indiquer ce que l'on peut dire sur la réalité de l'objet : les objets quantiques sont approximativement une onde et approximativement une particule, mais chaque description limite la validité de l'autre.

Niels Bohr a ajouté que cette imitation des aspects corpusculaire et ondulatoire n'est qu'un cas très particulier et qu'il y a quelque chose de très général, qui est une complémentarité liée au Ying et au Yang de la philosophie orientale, entre les divers aspects que peuvent révéler une expérience parce que finalement les objets quantiques n'ont pas de propriétés propres. Tout dépend de l'expérience que l'on fait, qui va révéler un aspect tantôt corpusculaire tantôt ondulatoire.

Dans cette liste d'auteurs, il nous manque quelqu'un dont on oublie souvent les contributions fondamentales à la mécanique quantique : c'est Einstein. Parfois on dit d'Albert Einstein : «il a fait de bonnes choses mais à la fin de sa vie c'était un dinosaure, un fossile, qui rejetait le côté révolutionnaire de la mécanique quantique ». En fait c'est une image d'Épinal. La BD essaie de rétablir les contributions révolutionnaires d'Albert Einstein. Au-delà des plus connues, comme le fait que la lumière ait des aspects particuliers, c'est lui qui, pendant des années, a rappelé avec insistance qu'il y avait quelque chose d'inacceptable dans l'interprétation donnée par Bohr, Heisenberg et autres : leur interprétation supposait que le caractère ondulatoire et flou des objets quantiques allait toujours rester localisé à l'intérieur des atomes ou dans des structures un peu plus grandes mais quand même dans le monde

microscopique, et que quand on parlait du monde qui nous entoure, le monde macroscopique, là on pouvait appliquer les lois habituelles de la physique classique et que, il n'y avait pas de problème, il suffisait de combiner les deux.

Einstein a insisté plusieurs fois en disant plusieurs choses.

D'abord en disant qu'il y a en fait des corrélations à distance entre objets quantiques. C'est l'article EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) qui a conduit, après « amplification » avec les idées de John Bell et les magnifiques expériences d'Alain Aspect, à comprendre qu'effectivement il y a une non localité profonde dans la physique quantique, ce qui a réinstauré le dialogue sur que veut dire la réalité quantique.

Einstein donnait d'autres exemples pour dire que le flou quantique remonte nécessairement du monde microscopique au monde macroscopique. Il se plaignait qu'en fait l'Univers autour de nous, d'après la physique quantique, devrait nous apparaître flou. Il a donné un exemple d'instabilité fondamentale, qu'il a décrit dans une lettre à Schrödinger, qui l'a raffiné un peu : en fait Einstein a donné l'exemple d'un baril de poudre qui explosait et Schrödinger a



formulé l'histoire célèbre du chat de Schrödinger ; dans cette histoire, selon qu'un événement quantique microscopique, qui se passe dans le système, va ou ne va pas, avec une probabilité quantique de 50 % au bout d'un certain temps, dégager un gaz qui tue ou ne tue pas le chat.

Et les équations de la physique quantique nous disent que, en fait, la réalité devrait

être une superposition entre un chat mort et un chat vivant !

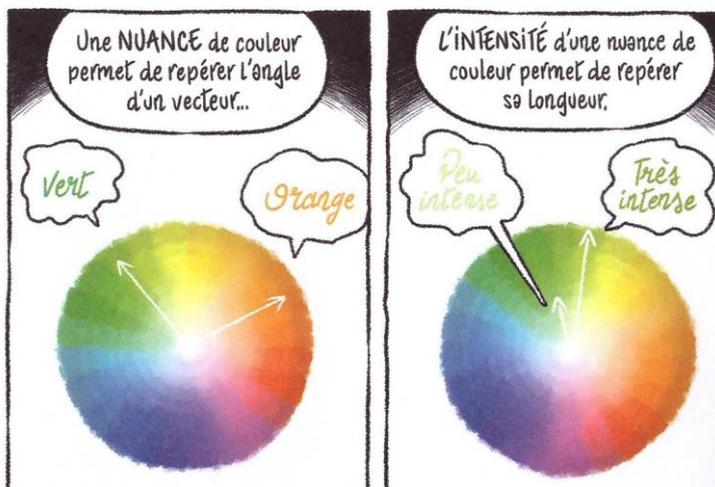
Schrödinger trouvait que c'était une sorte d'absurdité. Il y a quelque chose d'absurde dans le formalisme de la physique quantique. On sait aussi qu'Albert Einstein a donné aussi un autre exemple qui joue un très grand rôle dans notre histoire. Le 14 avril 1954 Einstein a donné à Princeton le dernier séminaire de sa carrière. Dans la BD vous aurez des renseignements de première main sur ce séminaire puisque je connais des gens, qui sont actuellement vivants, qui ont assisté à ce séminaire et donc on pouvait leur demander des choses sur ce qu'a dit Albert Einstein. Il y a en particulier la chose importante, qui jusqu'à ces dernières années ne se trouvait dans aucun livre. Personne ne le savait. J'ai trouvé en lisant les papiers d'Everett et en vérifiant. Un jeune américain Hugh Everett (1930 - 1982), qui joue un rôle important dans la BD, a assisté à ce séminaire et a suivi le raisonnement d'Einstein qui disait : si vous laissez, non pas une particule élémentaire, mais une petite bille de quelques microgrammes qui se balade dans une boîte ; vous la laissez dans un état quantique au début ; vous voyez la petite bille parce qu'elle est assez grande pour qu'on la voit ; si vous attendez suffisamment, sa description va devenir floue. C'est-à-dire qu'au bout d'un moment vous ne savez plus où elle est ; elle n'est nulle part dans l'espace ; Einstein a dit que le flou quantique est remonté au niveau macroscopique et il a prononcé la phrase suivante : *« il est difficile de croire que cette description est complète, elle semble rendre le monde nébuleux à moins que quelqu'un comme une souris ne le regarde. Est-il croyable que le regard d'une souris puisse changer considérablement l'Univers ? »*

Cette phrase a frappé Everett, on le sait, il était là ce 14 avril 1954, et quelques mois plus tard il a eu une idée pour penser la réalité quantique, pour expliquer cette idée sans mathématique (idée de films en surimpressions, voir plus loin).

Représentations visuelles de la réalité quantique

La BD n'utilise aucune équation mathématique, c'est pour tout le monde de 9 à 99 ans je le précise. On m'a confirmé que des enfants de 9 ans la lisent avec plaisir, on n'est pas forcé de tout comprendre ... ni à 99 ans d'ailleurs. Mais entre les deux on peut essayer de tout comprendre.

L'état quantique d'un système est décrit par un nombre complexe. Un nombre complexe ? ça ne veut rien dire ? Eh bien on peut le représenter et c'est là que la BD joue un rôle essentiel. C'est une idée que nous avons eu avec JC Carrière dans un livre il y a quelques années. Ce livre « entretien sur la multitude du monde » est toujours disponible chez Odile Jacob .



On peut représenter un nombre complexe par une couleur. Dans l'ensemble des nuances de couleurs, rouge, orangé, jaune, vert, bleu, violet, pourpre puis après le rouge vous pouvez recommencer, donc former le cercle des couleurs d'une façon continue ; alors vous pouvez repérer un angle par une couleur. Un nombre complexe c'est en fait une flèche dans un plan, comme ces flèches blanches. Pour repérer

une flèche il faut se donner une direction, et une longueur ; la nuance de couleur donne la direction et la longueur de la flèche peut être représentée par l'intensité de la couleur. Une couleur très faible que vous voyez à peine c'est une petite flèche, une couleur très intense est une grande flèche. Donc du coup vous pouvez représenter les superpositions quantiques d'états par des dessins qui superposent les choses. Je pense que c'est un bon exercice mental pour s'habituer à la réalité quantique, en tous cas c'est le choix de cette BD.

Prendre au sérieux la réalité quantique

Donc maintenant, ayant introduit cette idée, qu'est-ce qu'Everett a proposé ? Everett a suivi une idée qui venait d'Einstein disant il faut prendre au sérieux la physique. Quand la physique s'oppose au sens commun on pourrait avoir tendance à dire « gardons nos vieilles habitudes ». L'idée d'Einstein, qui reste à apprécier pour la physique quantique mais qui a été prise au sérieux par Everett, est de prendre le formalisme de la mécanique quantique au sérieux ainsi que ce qu'il nous dit sur la réalité.

La physique quantique nous dit que nous avons en fait des superpositions de réalités ; si on reprend l'expérience du chat de Schrödinger, où la physique quantique nous dit vous avez

plusieurs configurations possibles, vous avez un chat qui est à la fois mort et vivant. Sa représentation c'est que vous avez un nombre complexe qui représente l'amplitude du chat vivant qui apparaît en bleu sur le schéma et un autre nombre complexe qui représente l'amplitude du chat mort et qui est représenté en rouge sur le schéma.

Il faut cependant se souvenir que les représentations de réalités incluent non seulement le chat mais toutes les molécules autour, et ceux qui regardent, en particulier notre héros Bob qui lui aussi apparaît. Il va donc y avoir un Bob souriant qui est bleu et qui regarde le chat vivant et un Bob triste qui regarde le chat mort.

C'est une façon de vraiment voir les superpositions de réalités ; la plus proche possible de la description des mathématiques.

Certains d'entre vous ont vu le film d'Alain Resnais *smoking non smoking*. C'est un film où il y a plusieurs versions, qui ont donné lieu à plusieurs films : dans chaque film ça se branche d'une manière différente. Parfois on répond ça, parfois autre chose et le film après, continue l'histoire de manière différente. Ça c'est la version linéaire du film où vous avez choisi un sous-film avec une histoire cohérente qui se suit. Mais un film quantique ça consiste à surimprimer ces films sur la même pellicule ; si vous êtes dans la salle de cinéma vous verrez passer devant vous, plusieurs films à la fois. On pourrait se dire c'est un brouillamini infect. Il n'y a pas d'histoire logique, mais si vous réfléchissez vous verrez qu'à l'intérieur de chaque sous-film il y a une cohérence c'est-à-dire les personnages de chaque sous film ne sont conscients que de ce qui s'est passé avant dans ce sous film et on continue comme ça et donc la cohérence existe à l'intérieur des personnages de chaque sous-film parce qu'ils répondent effectivement en fonction de ce qui s'est passé dans un sous film. Ça donne cette image multisurimpressions qui est ici représentée par cette surimpression de réalités avec des couleurs différentes. Cette interprétation d'Everett, certains physiciens trouvent qu'elle semble totalement absurde parce qu'elle est contraire au sens commun. Dans un chapitre d'un livre technique sur l'interprétation de la mécanique quantique par Roland Omnès celui-ci reconnaît que « l'interprétation d'Everett de superposition de réalités comme un film multi surimpressionné est irréfutable mais je la refuse parce qu'elle viole le sens commun ».

Je pense que cette attitude est la même attitude que par exemple celle qui pendant 2000 ans a fait rejeter le mouvement de la Terre. D'ailleurs cela ne date pas de Copernic ! A l'époque de Copernic il y a eu beaucoup de résistance. Il y a quelques temps, je relisais les œuvres de Ptolémée. Il y a des phrases très violentes contre ce mouvement de la Terre et donc on voit que le débat était très vivant chez les Grecs. Les Grecs savaient que si vous vous déplacez sur un char à 20 km/h vous vous rendez compte que tout tremble et que si vous passez à 40 km/h tout va s'effondrer ; le char va partir en petits morceaux. Or le mouvement de la Terre, les Grecs savaient ça, c'est 100 000 km/h. Vous imaginez que là nous sommes tous partis à 100 000 km/h ? On se dit évidemment c'est absurde ! C'est tellement contraire au bon sens, au sens commun ! Il a fallu pour changer d'idée que Galilée, 2000 ans plus tard, construise une nouvelle physique et démontre qu'à l'intérieur de cette physique il y avait des mécanismes qui rendaient inobservable le mouvement de la Terre.

Quant à l'intérieur d'une théorie physique quelque chose est contraire au bon sens, au sens commun, mais que vous pouvez montrer qu'il n'y a pas d'effets observables violents, vous n'avez pas à le rejeter. C'est ce qui se passe pour Everett puisque les travaux d'Everett lui-

même portent sur le caractère aléatoire puis d'autres sur la décohérence. Nous savons grâce aux expériences faites par Serge Haroche, JM Raimond et Michel Brune et d'autres que les superpositions d'objets qui sont dans des états classiquement distinguables, qui ont par exemple 1 m de diamètre, cela existe pendant un temps bref avant qu'on ne puisse plus les distinguer à cause de la décohérence. En fait ce mécanisme enlève l'idée, il reste juste le blocage psychologique ; si vous admettez qu'il faut prendre au sérieux la physique, qu'il faut prendre au sérieux Everett.

J'ai un autre exemple : la théorie de la relativité nous dit que le passage du temps est une illusion ; vous ne pouvez pas en une seconde de votre temps vous retrouver dans 60 millions d'années dans le futur et voir la Terre comme elle sera dans 60 millions d'années. Cela paraît absurde puisque une des choses les plus prégnantes dans notre vie de tous les jours c'est que le temps passe. Or la physique nous dit qu'il ne passe pas ! Boltzmann disait des choses encore plus profondes !

Everett a adopté cette attitude héritée d'Einstein qu'il faut prendre au sérieux la physique quantique et j'aimerais donner un dernier exemple. Vous verrez cela dans la BD. Slava Rychkov est un scientifique qui travaille en cosmologie quantique. Je voudrais dire au passage que la majorité des gens qui travaillent à l'intersection de la cosmologie et de la physique quantique pensent que l'interprétation de la superposition d'Everett, c'est cela la réalité. C'est la bonne façon de penser la physique quantique. Même si, bien sûr, si je demandais à Claude Cohen Tannoudji, il me dirait que pour lui ce n'est pas nécessaire. Il ne veut sans doute pas aller aussi loin.

Ce que je voulais dire c'est que les données sur les fluctuations du fond diffus radioc cosmologique émis par le BB (big bang) comme on dit ont confirmé, sont en accord, avec les théories de Slava Rychkov et que l'origine des plus grandes structures de l'univers, non seulement de la Terre mais de la Galaxie, les distributions de masses des galaxies, la position des galaxies, tout cela vient d'une fluctuation quantique. Et donc les calculs quantiques de Slava Rychkov sont en accord avec ce que l'on observe. Donc on n'a pas de raisons de rejeter l'idée que notre univers est quantique, aussi, au niveau des galaxies. C'est-à-dire que les galaxies, notre univers, le plus grand, le plus macroscopique, est en superposition.



C'est sur cette vision vertigineuse, très belle et grandiose que finit la BD. Si vous la lisez, vous verrez qu'il y a un chemin qui part du cosmos et qui arrive au cosmos pour essayer de montrer la beauté de la physique quantique.

Le Mystère du
**MONDE
QUANTIQUE**

par Thibault Damour
& Mathieu Burniat

