

L'infiniment différent en mécanique quantique

Joël GARNIER, Groupe Math. et Philo, IREM de Besançon

2 avril 2017

Introduction

Voici quelques éléments pour faciliter une compréhension de ce que j'entends par l'expression 'infiniment différent' et permettre une lecture et une réflexion à propos du 'tout autre' en mécanique quantique.

L'infini apparaît comme un problème pour le physicien, avant tout dans son activité observationnelle ou expérimentale, car toute mesure d'une grandeur physique donne un résultat fini. Pour ce qui concerne l'observation, si l'on considère comme assez clair qu'il n'existe pas de perception de l'infini ou de perception infinie, la perception d'une donnée infinie et sa représentation n'ont alors aucun sens et il nous reste à nous préoccuper de la mesure.

Celle-ci, prise dans le sens de la lecture d'un paramètre d'aiguille sur un instrument, ne peut manifester l'actualité de l'infini ; ce qui reviendrait à mesurer l'incommensurable. Ou, pour le dire positivement, toute mesure physique est toujours finie dans son indication. Cette prise en compte de ce qui est indiqué (par l'appareil de mesure), la position du paramètre d'aiguille, découle de la nécessaire considération de la relation de la grandeur physique à l'appareil et à l'opération de mesure. Ainsi l'index que comporte l'instrument ne donne de résultat que si l'on peut 'aligner' la valeur indiquée de la grandeur mesurée entre deux graduations particulières de celui-là. L'opération même de la lecture (graduation, 'alignement') contraint ainsi toute mesure à être finie.

Cependant si un paramètre d'aiguille ne peut indiquer l'infini il peut indiquer zéro. Bien entendu, comme c'est le cas pour toute mesure physique, la valeur de la grandeur n'a de sens qu'à l'intérieur d'un intervalle borné qui constitue 'l'erreur de mesure' et contraint ainsi, supérieurement et inférieurement, la valeur de la grandeur en question. Il se peut donc qu'une grandeur physique soit nulle (aux erreurs de mesure près) et, si son inverse a un sens, sa valeur atteint alors l'infini. C'est le cas par exemple en régime de supraconductivité pour des paires de Cooper constituant un courant électrique dont, si l'on admet que la résistance est nulle, la conductivité est infinie. Mais bien souvent (masse nulle du photon, du gluon, zéro absolu, etc.) ces valeurs nulles (et à fortiori infinies) invitent à repenser les concepts qui donnent lieu à de telles conséquences. C'est le cas par exemple de grandeurs physiques qui divergent à cause d'un choix particulier de système de coordonnées et dont la finitude est rétablie lorsque l'on fait un choix plus judicieux de

celui-ci (considérons la trajectoire d'une particule qui se dirige vers un trou noir, du point de vue d'un observateur situé loin de celui-ci et muni de la métrique de Schwarzschild : à l'approche de l'horizon des événements, cette particule semble ralentir, se figer, et nécessiter alors un temps infini pour franchir cet horizon. Or il s'agit d'une aberration car cet horizon ne constitue en rien un mur physiquement infranchissable. Celle-ci résulte du fait que la métrique de Schwarzschild n'est pas adaptée dans ce cas et le problème disparaît en coordonnées d'Eddington-Finkelstein). La nécessité d'accorder une valeur infinie à une ou plusieurs grandeurs physiques me semble plutôt devoir conduire le physicien à un réexamen du cadre théorique dans lequel il œuvre et de ses limites.

L'infini se montre également problématique d'un point de vue théorique. En effet, que peut bien signifier une grandeur infinie pour le physicien ? Les techniques de renormalisation se sont avérées nécessaires pour compenser les infinis qui apparaissaient dans la théorie (en électrodynamique quantique, par exemple) et permettre ainsi aux concepts fondamentaux qui la sous-tendaient, de conduire (après cette réduction des infinis) à une opérationnalité se traduisant par une description satisfaisante des phénomènes physiques et de la mesure des grandeurs impliquées. Plus généralement, dès que le continu s'avère nécessaire (espace, temps, champs, variétés spatio-temporelles), on voit surgir l'infini sous la forme de l'indéfinitement analysable (l'outil différentiel pour Newton par exemple). Or un infini de cette sorte (indéfinitement sécable) est à la fois une solution (le champ et une propagation de proche en proche versus l'interaction à distance) et un problème lorsque l'on s'approche des limites. Dès qu'il s'agit du monde microscopique, la continuité et l'unicité de la trajectoire d'une particule élémentaire (ou d'un atome) ne sont plus des concepts compatibles avec le formalisme interprétant l'expérience. Or si l'on ne plus considérer qu'une particule parcourt une trajectoire, c'est-à-dire l'ensemble des positions occupées aux différents instants compris entre le début (émission) et la fin du trajet (détection, absorption) qu'advient-il de la continuité de l'espace et du temps, qu'advient-il du champ ? Le moins que l'on puisse faire à partir de cette injonction (nous interdisant de considérer la notion de trajectoire comme pertinente à l'échelle quantique) est de s'interroger relativement au fait que les phénomènes quantiques ont lieu dans l'espace-temps. Le terme quanta lui-même nous indique les déchirures de ce qui apparaissait comme un champ, comme un continu mathématique, La grandeur physique (énergie d'un atome, par exemple) est alors réduite à un ensemble discret de valeurs possibles.

Que la valeur d'une grandeur physique devienne infinie et l'on comprend aisément la perplexité du physicien. Cependant il existe une autre façon de parler de l'infini en mécanique quantique, qui génère une perplexité au moins équivalente : il s'agit de ce que je nommerais l'infiniment différent. Ce qui est compris ici sous cette expression consiste dans la nécessité pour un même objet de partager des propriétés contradictoires. Nous parlerons de la célèbre dualité onde-particule qui conduira Bohr à forger le concept de complémentarité. Celui-ci permet d'éviter la contradiction précédente en postulant d'abord que ces propriétés contradictoires ne peuvent être simultanément mesurables par un dispositif expérimental et ensuite qu'en dehors de toute mesure il n'est pas correct de parler de grandeur physique. Lorsqu'on se questionne sur la nature des particules élémentaires qui constituent la matière, lorsqu'on étudie les interactions fondamentales qui les lient, on se rend compte qu'il y a des cas où leur comportement est ondulatoire et d'autres (complémentaires) où leur comportement est corpusculaire. Une même entité revêt tantôt l'un, tantôt l'autre, de deux visages infiniment différents.

Une expression intéressante du technolècte des physiciens, en mécanique quantique, consiste dans l'expression qui dit de deux états qu'ils sont 'orthogonaux'. Confondant, par

souci de compacité, le vecteur qui représente l'état du microsysteme dans un espace de Hilbert et l'état physique lui-même. Lorsqu'on dit de deux états qu'ils sont orthogonaux on veut signifier leur incompatibilité. Par exemple la partie spin de la fonction d'onde (spin orbitale) de l'électron peut être soit $|+\rangle$ soit $|-\rangle$ (en unités $\hbar/2$), ce qui correspond (pour l'observable z) à : 'spin dirigé vers le haut' ou 'spin dirigé vers le bas'. On comprend bien que ces deux possibilités s'excluent mutuellement. Pourtant, comme chacun sait, en mécanique quantique un chat peut être à la fois mort et vivant, ce qui signifie qu'avant la mesure (du spin selon z) l'électron peut être dans un état superposé de spin $|+\rangle$ et $|-\rangle$. Voilà qui fait des microsystemes des entités infiniment différentes de ce à quoi l'expérience humaine est habituée.

Dans ce qui suit on va tenter de montrer que ce qui rend possible le principe d'un raisonnement inductif (équivalent à la récurrence, en mathématiques) c'est la monotonie absolue, or celle-ci n'existe pas en physique ; une induction procédant par récurrence peut échouer : dans ce cas on voit surgir l'infiniment différent. Le terme 'infiniment' ne sert ici qu'à hisser la différence au rang d'incompatibilité.

La monotonie absolue se traduit dans l'univers du mathématicien par le fait que rien de nouveau ne surgit et ainsi ce qui a été fait une fois peut l'être indéfiniment. Or, pour le physicien, rien n'offre une telle garantie. Pourtant, dans le cas qui va nous occuper, rien ne semble indiquer d'où peut survenir cet imprévu qui nous contraindra à voir 'le même' comme deux entités infiniment différentes.

1 Continu et discontinu : champs et particules.

La physique classique de la fin du dix-neuvième siècle (à laquelle on peut ajouter les théories de la relativité restreinte et générale du vingtième siècle) reconnaît deux types d'objets qui s'opposent du point de vue de la continuité : d'une part les champs (champs électrique et magnétique ou électromagnétique de Maxwell, champ gravitationnel d'Einstein, par exemple) qui règnent partout dans un volume donné d'espace et, d'autre part, les particules élémentaires, entités localisées, au sens où elles occupent une position définie à un instant donné et qui sont ponctuelles à l'observation (électron, neutrino, quark).

La notion d'atome, au sens originel d'insécabilité, tel que le point dans l'axiomatique euclidienne (ce dont la partie est nulle), n'est envisagée ici qu'en un sens plus faible de l'indivisibilité. En effet, pour l'astronome par exemple une planète est un atome et pour le cosmologiste ce sont les galaxies (ou même les amas de galaxies) qui sont considérées comme des points. L'essentiel tient ici au fait que l'objet considéré apparaît comme délimité dans l'espace : cette frontière définit ainsi un intérieur et un extérieur, un individu. Cet individu 'occupe' une région de l'espace, à une date et pour une durée données, sa présence y est donc délimitée. Et si mouvement il y a, c'est toute la région occupée qui est déplacée. Le champ aussi est délimité en un instant donné (cas de l'onde sphérique, par exemple) mais si propagation il y a la région occupée ne se déplace pas : elle s'étend.

Cependant ces deux entités ne sont pas sans relations, le champ (continu) peut émaner d'une source (ponctuelle) : ainsi d'un point de vue génétique il n'y a de champ que dans la mesure où il existe une source qui le produit. Mais si la source d'un champ électromagnétique cesse d'exister à un instant t_0 (par exemple une antenne dans laquelle les électrons sont agités par un courant, que l'on coupe à l'instant t_0) le champ, lui, continue d'exister après t_0 , de manière autonome et se propage dans l'espace vide indéfiniment (ou jusqu'à

ce qu'il soit absorbé, si l'espace n'est pas vide).

1.1 Champs

Le champ est par définition une entité délocalisée, c'est-à-dire qu'en chaque point de \mathbb{R}^3 (entendez l'espace enfermé dans un volume) ou \mathbb{R}^4 (pour un espace de Minkowski, espace-temps relativiste) il existe une valeur de la grandeur associée au champ particulier que l'on considère. Ainsi un champ de température consiste en la donnée, en chaque point d'un corps, d'une grandeur scalaire correspondant à une température.

Bien entendu rien n'oblige pour autant à admettre que la donnée d'une grandeur physique en chaque point de l'espace y soit inscrite instantanément, ni non plus que cette valeur soit partout la même. Ainsi le champ peut être variable dans l'espace et dans le temps : le champ peut alors se propager.

Nous pouvons considérer comme exemple de champ statique (i.e., qui ne varie pas au cours du temps) celui qui règne autour d'un électron isolé dans une enceinte vide et supposé au repos par rapport à elle. Il existe, en tout point distant de cette charge, un champ électrostatique dont la valeur du potentiel dépend de la distance à cette charge et décroît comme l'inverse de celle-là. Ce champ électrostatique qui émane de la charge est coprésent partout dans l'enceinte, au sens où il existe simultanément en des points différents. C'est en ce sens que la continuité du champ fait de lui une entité délocalisée contrairement à l'atome ou à la particule élémentaire (toujours d'un point de vue classique) qui n'existent qu'en un point et un seul à chaque instant. Dans le cas de notre électron isolé nous avons considéré comme grandeur associée au champ sa charge électrique, mais il possède aussi cependant un autre type de charge : sa masse. Il doit donc régner en chaque point de l'espace autour de cet électron un champ gravitationnel dont la valeur du potentiel décroît comme l'inverse à la distance qui sépare le point considéré de l'électron. Ainsi les champs (ici électrique et gravitationnel) peuvent se superposer et être également, en chaque point, coprésents.

Si par définition la particule est une unité délimitée, au sens où il existe une frontière entre elle et le reste de l'univers (mais surtout entre elle et l'espace environnant qui la sépare d'autres particules proches, avec lesquelles on ne peut la confondre) cela contraint le mouvement qui la conduit d'un point à un autre de l'espace à ne consister qu'en une unique trajectoire. La particule est ainsi ce qui demeure compacté sur soi et ne peut être transféré qu'entièrement. La particule se meut comme totalité. Alors que le champ, qui se propage à partir d'une source, se scinde et explore, quant à lui, l'ensemble des trajectoires possibles et se trouve ainsi partiellement présent en différents endroits simultanément. Des auditeurs en cercle autour d'un chanteur recevront tous un peu des ondes sonores (résultant d'un champ de pression) émises par la voix de celui-ci et l'entendront tous. Mais s'il émet une particule (disons une gouttelette de salive) alors un seul, éventuellement, des auditeurs en sera le récipiendaire tandis que tous les autres seront épargnés.

Le champ ne manifeste jamais son existence par lui-même, pour le mettre en évidence il faut y insérer une 'particule-test', c'est-à-dire une particule portant une propriété sensible à l'existence de ce champ particulier. Par exemple, si nous produisons un champ électrostatique en disposant une densité de charge électrique en un point (ou un petit volume) de \mathbb{R}^3 et que nous considérons qu'en dehors du petit volume chargé l'espace est vide ; alors rien ne nous indique l'existence de ce champ électrique. Il est nécessaire, pour le rendre manifeste, d'adjoindre une particule chargée à notre expérience de pensée et de mesurer l'écart entre sa trajectoire, subissant l'interaction électrique (attractive ou répulsive), qui

se traduira par une accélération, et la trajectoire inertielle que la particule libre aurait en dehors de la présence de ce champ (c'est-à-dire un mouvement rectiligne uniforme dans le cas le plus simple).

Doit-on supposer que si le champ ne se manifeste qu'à l'occasion d'interactions, il est possible qu'il n'existe pas en dehors de celles-ci? Le concept de champ n'est-il qu'un concept mathématique utile ou doit-il être envisagé comme une entité physique, c'est-à-dire ici essentiellement autonome, existant par elle-même, avant même que l'interaction ne la révèle? La Théorie Quantique des Champs accorde le même degré d'existence au champ qu'à la particule matérielle. En effet celle-ci peut être vue comme l'excitation d'un champ de matière et le champ d'interaction disparaître au profit d'une particule médiatrice (le boson de cette interaction). Ainsi nulle supériorité ou infériorité de la particule sur le champ, du point de vue de la dignité d'existence.

1.2 Particules

Depuis l'intuition atomistique de Leucippe et Démocrite rares ont été les penseurs s'inscrivant dans cette lignée (Épicure, Lucrèce, Galilée, par exemple) non seulement parce qu'elle fut longtemps difficile à assumer face aux interdits des autorités religieuses et à la prégnance de la tradition (Aristote, pour qui le vide ne peut exister et qui adopte une théorie continue de la matière) mais aussi parce que, pour en faire une théorie scientifique, il faut, au moins, pouvoir observer et mettre expérimentalement en évidence ces entités postulées que sont les atomes. Or, étant donnée l'extrême petitesse de ces entités, les instruments d'investigations et les techniques de leur mise en œuvre n'apparaîtront que tardivement.

L'expérience de Rutherford (1909) est l'archétype de ces techniques expérimentales de recherche des entités fondamentales, d'exploration de la matière aux plus petites échelles, que l'on a coutume de nommer (Michel Paty, *La matière dérobée*) : 'procédures du crible'. Tout comme le crible permet de ne laisser passer que les entités plus petites que la maille du réseau constituant le tamis, de la même manière ces 'procédures du crible' consistent à sonder la matière en la bombardant d'entités microscopiques, en détectant le comportement de ces sondes (traversent-elle? rebondissent-elles? sont-elles déviées?) et en recueillant, bien évidemment, les données quantitatives qui permettent d'établir les pourcentages d'entre ces entités qui adoptent tel ou tel comportement. Ce que montre cette expérience de 1909 c'est qu'une feuille constituée d'or est traversée par des particules α (la sonde utilisée par Rutherford) mais que certaines d'entre-elles rebondissent sur la cible (les noyaux des atomes d'or) pour revenir en direction de la source.

L'interprétation du modèle atomique découlant de cette expérience oblige alors à ne plus prendre le mot 'atome' dans son sens littéral (qui signifie : non décomposable) dans la mesure où l'expérience en révèle les constituants : l'existence d'un noyau (constitué de protons, car le neutron, comme second composant du noyau, ne sera découvert par Chadwick qu'en 1932) d'un diamètre d'environ 3.10^{-14} mètres pour un atome d'or (79 protons [et 118 neutrons]) autour duquel orbitent les électrons. L'atome, composé du noyau et de son cortège électronique, atteint une taille d'environ 10^{-10} mètres.

Depuis ces expériences pionnières, et guidés par la mécanique quantique puis la théorie quantique des champs, les physiciens ont bâti un édifice théorique regroupant les différentes entités fondamentales, désormais dénommées 'particules élémentaires'.

Nos cribles modernes se nomment 'accélérateurs de particules' et ils permettent actuellement (pour le L.H.C., du Laboratoire Européen pour la Physique des Particules,

C.E.R.N., Genève) d'atteindre une résolution de 10^{-18} mètres !

Il est en effet nécessaire d'indiquer cette résolution car le concept d'éléментарité est suspendu à notre capacité à pénétrer des dimensions spatiales de plus en plus petites. Ainsi si l'on considère une résolution de 10^{-10} mètres, l'atome apparaît comme ponctuel et pour le décomposer et apercevoir son noyau, il nous faudra l'observer avec une précision de 10^{-14} mètres, c'est-à-dire dix mille fois meilleure !

Dans la communauté des physiciens des particules il est de coutume de répondre par une petite boutade (qui en réalité n'en est pas une !) à la question : -« Qu'est-ce qu'une particule élémentaire ? » -« C'est une particule qui figure dans la *Review of Particle Physics* du Particle Data Group ! ».

En effet l'éléментарité est relative au pouvoir de résolution des instruments et donc les particules élémentaires dont il va être question n'apparaissent comme ponctuelles, c'est-à-dire sans structure, que jusqu'à 10^{-18} mètres.

L'édifice théorique qui fournit la table de ces particules élémentaires se nomme 'Modèle Standard' (émergeant, sous sa forme actuelle, au milieu des années soixante-dix). Toutes les entités qu'il a postulées ont été confirmées par l'observation (jusqu'au boson de Higgs en 2012). Seul le 'graviton' échappe encore aux expérimentateurs.

Observer n'est possible que si l'on est capable de produire ces entités élémentaires et pour les produire on se sert de l'équivalence entre la masse et l'énergie fournie par l'équation fondamentale de la dynamique relativiste :

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

(si l'on considère la particule au repos, l'impulsion p [produit de la masse par la vitesse] est nulle et l'on retrouve la fameuse équation d'Einstein $E_0 = m_0 c^2$). Il s'agit très clairement d'une transformation de l'énergie (due au mouvement des particules accélérées) en matière (particules élémentaires). Ici, par le biais du choc, le physicien transforme le mouvement en matière.

En Physique des Hautes Énergies (i.e., physique des particules élémentaires) le nombre de particules ne se conserve pas ; ainsi $1+1$ donne 20 ou 100 ou 1000 ! Car un proton percutant un autre proton, par exemple, donne naissance à des dizaines, des centaines de protons et également à d'autres types de particules (électrons, neutrinos,...) à partir des deux initiaux ; pourvu que soient également produites autant de charges négatives que nécessaire pour que le bilan (ici $+2$ avant le choc) conserve la charge (et que soit également conservées d'autres quantités, dans le cas général, comme les nombres leptonique et baryonique, l'hypercharge, l'isospin,...).

1.3 Modèle Standard

Il existe deux catégories de particules élémentaires : celles qui constituent la matière figurent dans la catégorie des fermions et celles qui véhiculent les interactions (nucléaires, électromagnétiques, ...) s'exerçant entre particules figurent dans la catégorie des bosons. Les lois auxquelles obéissent ces deux types de particules ne sont pas les mêmes pour certaines de leurs propriétés (statistique de Fermi-Dirac ou de Bose-Einstein). Par exemple, seuls les fermions peuvent être 'directement' observables alors que les bosons virtuels (i.e., qui n'existent que pendant une durée très brève et inaccessible, par principe, à l'observation) ne peuvent être mis en évidence qu'à partir de leurs produits de désintégration. D'autre part si un fermion est dans un état donné, il interdit alors à un autre fermion

d'être dans le même état (au même endroit) ; alors que si un boson est dans un état donné il accroît la probabilité qu'un autre boson soit dans ce même état (au même endroit).

Pour ce qui concerne la matière (et exception faite des antiparticules), les fermions sont au nombre de 12 : 6 leptons et 6 quarks.

- Les 6 leptons sont composés de :
 - 3 sortes de particules chargées négativement : l'électron, le muon et le tauon. Ces deux derniers ne diffèrent de l'électron que par leurs masses très supérieures à la sienne.
 - 3 sortes de particules neutres et de masses presque nulles : les neutrinos (de types électronique, muonique et tauique) complètent cette famille des leptons.
- Les 6 quarks sont composés de :
 - 3 quarks chargés négativement : Down, Strange, Beauty (ou Bottom) de masse croissante.
 - 3 quarks chargés positivement : Up, Charm, Top (ou Truth) de masse croissante.

Ces quarks, qui ne peuvent se manifester individuellement, se combinent par trois ou par deux.

- Un triplet d'entre eux forme les baryons (par exemple le proton est un baryon constitué de deux quarks Up et d'un quark Down ; le neutron étant, quant à lui, composé de deux quarks Down et d'un quark Up). En plus du proton et du neutron il existe une grande quantité de types de baryons
- Ces quarks peuvent aussi se combiner en paire quark-antiquark, appelés mésons, mais ceux-ci appartiennent à la catégorie des bosons et sont impliqués dans les interactions entre particules matérielles, sans être eux-mêmes des constituants de la matière.

Un mérite du Modèle Standard est sa capacité à rendre compte de l'immense variété de la matière telle qu'elle nous apparaît sur Terre (c'est-à-dire à des températures, et donc des énergies, faibles) à partir de quelques éléments et de leurs arrangements. Nous savons que la diversité des types de matière (incluant le vivant) que nous percevons dans notre environnement résulte de combinaisons différentes de molécules, elles-mêmes constituées de configurations différentes de la centaine d'espèces d'atomes recensés dans la table périodique des éléments (i.e., le tableau de Mendeleïev [1869]). Cette centaine d'atomes n'étant elle-même rien d'autre que des combinaisons différentes de seulement quatre entités fondamentales : l'électron, le neutrino électronique, le quark Up et le quark Down (compte non tenu des antiparticules et des bosons). Ainsi les diverses combinaisons de ces quatre types d'entités matérielles élémentaires génèrent l'extraordinaire profusion que nous contemplons sur Terre. Les deux autres familles (celle comprenant le muon, le neutrino muonique et les deux quarks C et S et celle comprenant le tauon, le neutrino tauique et les deux quarks T et B) sont peuplées de particules dont les masses sont si élevées qu'elles ne se manifestent qu'à des énergies importantes et se rencontrent dans le cœur des étoiles, les phénomènes cosmiques, le L.H.C., etc...

2 Microsystèmes

2.1 Questionnement sur la nature des microsystèmes

Comme nous l'avons bien compris les champs sont absolument distincts des particules élémentaires et ces deux entités se comportent de manière incompatible dans certaines circonstances.

Si, comme nous l'avons dit, un champ se propage en suivant à la fois tous les chemins possibles et qu'une particule élémentaire ne peut suivre qu'une seule trajectoire à la fois ; il est simple d'imaginer une expérience dans laquelle deux chemins sont possibles de la source au détecteur, permettant ainsi de vérifier si l'entité considérée emprunte simultanément ces deux chemins (interférences dues à un champ) ou bien si l'un des deux seulement est suivi (trajectoire d'une particule). C'est, ici simplifiée, l'idée de base de l'expérience dite des 'fentes d'Young'.

Or lorsque nous réalisons ce type d'expérience visant à discriminer le champ (ou onde) de la particule (ou corpuscule), en vérifiant si une entité emprunte un chemin unique parmi deux possibles ou si elle emprunte les deux à la fois ; toujours la réponse dépend, de manière parfaitement déterminée, de la façon dont on pose la question à la nature ! C'est à dire de l'instrument d'observation que l'on emploie et non d'une éventuelle nature corpusculaire ou ondulatoire intrinsèque aux entités elles-mêmes.

Dans une circonstance expérimentale bien définie (c'est-à-dire incorporant les instruments de mesure) un électron, par exemple, empruntera toujours un seul des chemins possibles et cela autant de fois que l'expérience sera répétée, dans les mêmes conditions.

Mais si l'on conserve la même source d'électrons, envoyés un par un dans un interféromètre, les données obtenues ne sont compréhensibles que comme résultat d'un processus d'interférences, nécessitant que les deux chemins aient été simultanément empruntés par le même électron. Ce qui est une contradiction dans les termes et impose simplement d'abandonner la notion de trajectoire.

Ainsi, pour une même entité, certains contextes expérimentaux traduisent ses propriétés corpusculaires et certains autres traduisent, au contraire, ses propriétés ondulatoires !

Niels Bohr, pour affronter ce considérable changement de paradigme en physique, introduit le concept de complémentarité. Car, en effet, ces propriétés contradictoires d'une même entité (prendre un seul chemin à la fois parmi deux possibles ou emprunter les deux en même temps) ne peuvent jamais, pour lui, être simultanément rendues manifestes dans une expérience ; chacune nécessitant un dispositif expérimental exclusif de l'autre. Si l'on restreint toute théorie physique à ne parler que de ce qui est manifesté par l'expérience (indépendamment de ce qui existe en dehors de toute observation ou entre deux observations) alors le concept de complémentarité prend sens en incluant l'instrument de mesure comme partie intégrante du phénomène.

2.2 Gedankenexperiment (expérience de pensée)

Voici le schéma de principe d'une expérience (Figure 1) grâce à laquelle on soumet les objets, produits un par un par la source, au choix qui consiste soit à emprunter simultanément les deux chemins (trajet 1 et trajet 2) soit un seul de ces deux chemins à la fois. Le dispositif est réglé de telle sorte qu'une onde qui arriverait sur la première lame semi-transparente (ST1) se scinderait en deux ondes (d'intensité 1/2 de l'onde initiale dans le cas grossièrement idéalisé considéré ici) qui parcourraient ainsi les deux chemins optiques

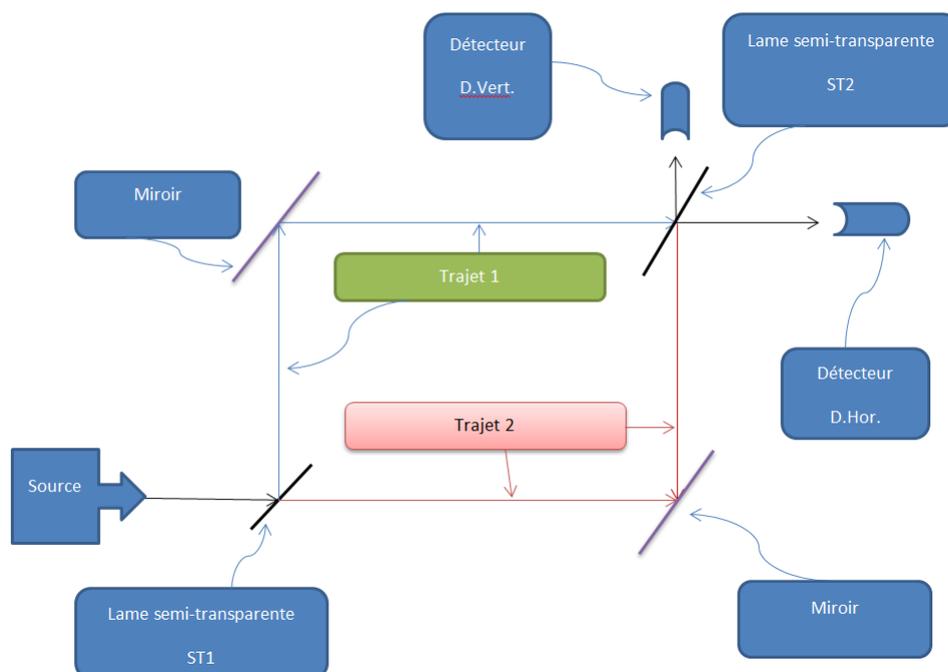


FIGURE 1 – Interferomètre de Mach-Zehnder

(trajet 1, trajet 2) se retrouvant au niveau de la deuxième lame semi-transparente (ST2) dans une interférence destructive vers le haut (Déetecteur Vertical) et constructive vers la droite (Déetecteur Horizontal). Lorsque l'expérience est réalisée, les objets (qu'il s'agisse de photons, d'électrons, voire d'atomes ou de molécules) se comportent comme une onde et le détecteur vertical n'est jamais activé : bien que la source émette ces entités une par une, les deux trajets doivent avoir été simultanément empruntés par chacune.

On peut conserver le même dispositif et supprimer la deuxième lame semi-transparente (ST2) (Figure 2) et supposer ainsi que le phénomène est le même, dans la mesure où une même entité est produite par la source et soumise à une même situation (constituée par la lame semi-transparente (ST1), qui, encore une fois, impose soit d'emprunter une trajectoire et une seule, soit les deux simultanément).

En ajoutant un compteur de coïncidences (qui se déclenche si les deux détecteurs sont simultanément activés) on obtient un résultat étonnant : celui-ci affiche toujours un résultat nul, ce qui signifie que les photons (ou électrons,...) déclenchent soit le détecteur vertical (une fois sur deux en moyenne) soit le détecteur horizontal (dans la même proportion moyenne) traduisant ainsi le fait que les photons (électrons, ...) n'empruntent qu'un seul des chemins possibles et jamais simultanément les deux ! Nous posons à la nature, avec deux dispositifs différents, la même question : un chemin ou les deux ?

Dans le premier cas la réponse est : toujours les deux' et dans le deuxième la réponse est : 'jamais les deux'). Puisqu'il s'agit dans ces deux expériences des mêmes entités soumises à une même alternative, qu'est-ce qui explique ces réponses contradictoires ?

Si l'on peut connaître le chemin emprunté (deuxième cas) l'objet se comporte comme une particule (un seul chemin à la fois est suivi et l'on somme les probabilités) et si l'on ne peut pas, il se comporte comme une onde (les deux chemins sont simultanément empruntés et l'on somme les amplitudes de probabilités).

"Qu'est-ce qu'un électron ?", cette question ne peut plus se poser ainsi, il devient

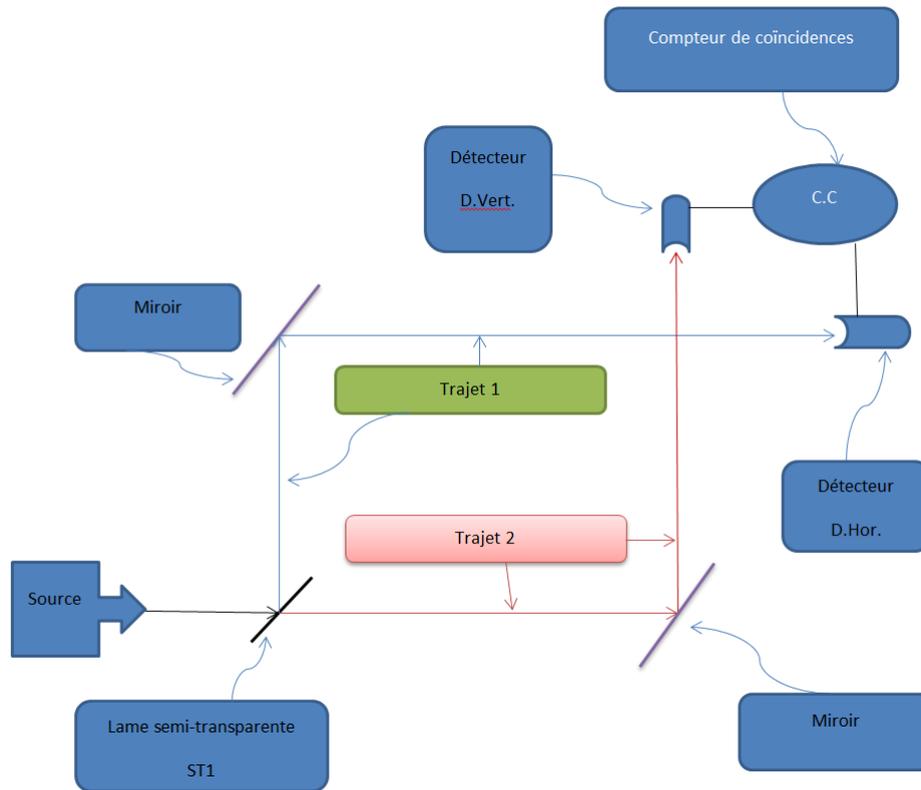


FIGURE 2 – Compteur de coïncidences

nécessaire de préciser relativement à quel contexte expérimental est traitée cette entité. Si le phénomène est ce qui se manifeste à nous, alors nous ne pouvons en parler en dehors des moyens mêmes par lesquels il se donne à la mesure.

Ces entités au comportement étrange (mais parfaitement déterminé en fonction du contexte) qui se manifestent tantôt comme des ondes et tantôt comme des corpuscules, ne sont ni tout à fait des ondes ni tout à fait des particules ; on peut les nommer ‘quants’, on utilise plus généralement l’expression ‘microsystèmes’ pour spécifier qu’elles obéissent aux règles de la mécanique quantique (somme des amplitudes de probabilités ou somme des probabilités).

2.3 Expériences à choix retardé

Le principe d’une expérience à choix retardé (initialement proposée dans les années soixante-dix par J. A. Wheeler) consiste, pour le dispositif considéré plus haut, à tirer aléatoirement si l’on place ou non la deuxième lame semi-transparente (ST2) après que le photon (électron, etc.) a passé la première (ST1). Il s’agit ici de déconnecter causalement (au sens de la relativité restreinte) la décision prise sur ST1 de la présence ou non de la seconde lame ; qui conditionne pourtant, on s’en souvient, le résultat : un seul chemin (ou les deux à la fois) sera (seront) emprunté(s).

La difficulté d’incorporer ces résultats dans le cadre de l’espace-temps relativiste résulte du fait qu’ici (dans le référentiel du laboratoire, au repos par rapport au dispositif interférentiel) l’effet (*‘un chemin ou les deux’*), produit à l’instant t_1 au point de l’espace où se trouve ST1, semble précéder la cause (*‘présence ou absence de ST2’*) fixée

aléatoirement à l'instant t_2 (postérieur à t_1) !

On peut admettre que la difficulté de penser le phénomène quantique dans un cadre spatio-temporel relativiste provienne essentiellement, répétons-le, de cette déconnexion causale entre l'événement en ST1 (c'est à cet endroit et à ce moment que peut se faire le plus tardivement le 'choix' pour le photon d'emprunter un seul ou les deux chemins) et l'événement postérieur, en ST2 : le choix aléatoire de la présence ou de l'absence de la seconde lame, qui ferme ou ouvre l'interféromètre. C'est-à-dire, qui détermine si l'on peut ou non avoir connaissance du chemin emprunté ; dans le cas d'une réponse positive il faudra sommer les probabilités et un seul détecteur est activé à la fois ; dans le cas d'une réponse négative il faudra sommer les amplitudes de probabilité, ce qui induira un terme d'interférence et expliquera le fait que le détecteur vertical n'est jamais activé.)

Pour étudier les réalisations effectives de ce type d'expériences on pourra lire avec profit la thèse de doctorat de Vincent Jacques : *Source de photons uniques et interférences à un seul photon. De l'expérience des fentes d'Young au choix retardé* (soutenue en 2007 à l'E.N.S. Cachan), qui fournit en particulier les références suivantes :

- Expériences à choix retardé avec des sources de photons uniques : La première expérience de ce type a été réalisée en 1989 par l'équipe de W. Martienssen [J. Balduhn, E. Mohler, and W. Martienssen. **A wave-particle delayed-choice with a single-photon state.** Z. Phys. B – Condensed Matter, 77 : 347–352,(1989)].
- Puis en 1991 [J. Balduhn and W. Martienssen. **Are there spontaneous objectifications of the wave-particle properties of a single photon ?** Z. Phys. B – Condensed Matter, 82 : 309–316, (1991)].
- Expériences à choix retardé réalisées avec des neutrons [T. Kawai, T. Ebisawa, S. Tasaki, M. Hino, D. Yamazaki, T. Akiyoshi, Y. Matsumoto, N. Achiwa, et Y. Otake. **Realization of a delayed choice experiment using a multilayer cold neutron pulser.** Nucl. Instrum. Methods Phys. A, 410 :259–263,(1998).]
- Ou des atomes d'hydrogène [B. J. Lawson Daku, R. Asimov, O. Gorceix, C. Miniatura, J. Robert, et J. Baudon. **Delayed Choices in atom Stern-Gerlach interferometry.** Phys. Rev. A, 54 :5042–5047, (1996).]

Les résultats expérimentaux montrent que lorsque l'interféromètre est fermé par la présence de ST2, tout se passe comme si classiquement les deux chemins avaient été suivis par une onde et lorsque l'interféromètre est ouvert en l'absence de ST2, tout se passe comme si un seul chemin était emprunté par chaque particule. Dans l'une de ces expériences le photon se trouve au milieu du bras de l'interféromètre (qui mesure un peu moins d'une cinquantaine de mètres) lorsque le tirage aléatoire de la présence ou absence de ST2 est réalisé.

Ainsi, que la lame ST2 soit déjà présente ou non lorsque le photon est dans l'interféromètre ne change en rien les résultats !

3 Fonction d'onde

Nous pouvons conclure des précédentes remarques que les microsystèmes considérés en Mécanique Quantique ne sont ni des ondes, ni des particules. Mais s'ils se manifestent toujours comme particules à la détection (un impact bien localisé sur le détecteur), les interférences (destructives et constructives) dans le dispositif de Mach-Zehnder, invalidant la notion de trajectoire, nous invitent à en faire une description ondulatoire.

En Mécanique Ondulatoire la fonction d'onde d'une particule ne correspond pas à une

onde physique, au sens où elle serait la manifestation d'une grandeur physique variable dans le temps et dans l'espace (bien que nous écrivions cette fonction d'onde à partir de grandeurs physiques), comme une onde sonore par exemple (la grandeur physique étant la pression). Même si l'intuition originelle de De Broglie et la théorie de Böhm pensent cette onde comme se propageant réellement dans \mathbb{R}^3 , celle-ci est présentée, dans l'interprétation orthodoxe ('Mécanique Quantique des manuels') comme représentant une information probabiliste (de trouver la particule en tel point de l'espace au temps t , par exemple). Elle devient ainsi un être mathématique abstrait (c'est une fonction nécessairement complexe), représentant une amplitude de probabilité (et non une probabilité) et dont le carré prend donc (pour une fonction normalisée) une valeur réelle comprise entre 0 (certitude que la particule ne sera pas trouvée au point considéré, par exemple) et 1 (certitude que la particule sera trouvée en ce point).

Pourquoi le terme 'onde' est-il alors employé ? Simplement parce qu'elle est formellement semblable à l'équation d'une onde physique (i.e. même écriture mathématique que pour la corde vibrante, la vague à la surface de l'eau, l'onde sonore, c'est-à-dire une fonction de d'Alembertien nul,...). Dans le cas le plus simple, celui d'une particule libre (i.e., non soumise à une force) et sans spin, cette fonction d'onde met en jeu deux grandeurs physiques : l'énergie et l'impulsion.

Le premier rapport établi entre particule et onde a été formulé par Einstein pour expliquer un phénomène expérimental étrange : l'effet photo-électrique. Celui-ci se manifeste, lorsqu'on éclaire une plaque métallique, par le fait que des électrons sont arrachés à cette plaque et qu'il n'est pas possible de rendre compte des caractéristiques de ces éjections en continuant de considérer la lumière comme une onde électromagnétique mais que l'on peut adéquatement décrire ce phénomène si on la considère plutôt comme constituée de corpuscules : *quanten licht* ou photons.

Cette nature ondulatoire de la lumière était pourtant admise (semblant même définitivement établie pour ceux qui acceptaient la notion d'*experimentum crucis*), tant du point de vue théorique qu'expérimental, par la communauté des physiciens depuis les travaux pionniers de Huygens, Young, Arago, Fresnel, Fizeau, etc. d'une part, et la magistrale synthèse réalisée par James Clerk Maxwell dans sa théorie électromagnétique, d'autre part.

En 1905, l'audace du jeune Einstein a conduit à la notion de quantum de lumière, considérant que l'énergie et l'impulsion lumineuse sont produites (par la source) et absorbées (par les électrons de la plaque métallique) par paquets entiers et ne sont pas, comme l'exige une représentation ondulatoire, partout réparties dans le champ électromagnétique, ce qui conduirait chaque électron de la plaque à ne recevoir qu'une partie de cette énergie et de cette impulsion, alors que l'expérience montre qu'un seul électron en accapare la totalité.

Ainsi à l'onde lumineuse était dorénavant associée une particule (le photon) ; l'énergie de celle-ci étant reliée à la fréquence de celle-là via la constante de Planck.

$$E = h\nu$$

En 1924, Louis De Broglie, généralisant la démarche d'Einstein, propose qu'à chaque particule soit associée une onde (dite onde de De Broglie) la longueur de celle-ci étant reliée à l'impulsion de celle-là via la constante de Planck.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Nous pouvons dorénavant passer des caractéristiques corpusculaires aux caractéristiques ondulatoires par ces deux relations d'Einstein et de De Broglie, réécrites de la manière suivante :

$$E = \hbar\omega$$

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$$

(utilisant \hbar la constante de Planck divisée par 2π , la pulsation ω au lieu de la fréquence ν [$\omega = 2\pi\nu$] et le vecteur d'onde \mathbf{k} au lieu de la longueur d'onde λ [la norme de $k = 2\pi/\lambda$]).

4 Vecteur d'état

La Mécanique des Matrices de Heisenberg (1925), équivalente à la Mécanique Ondulatoire de De Broglie et Schrödinger, fournit une base à Dirac pour la création (1930) d'un formalisme et de notations généralement employés aujourd'hui pour écrire les équations de la Mécanique Quantique et faire les calculs d'une manière élégante et simple.

La notion de vecteur d'état, dans le formalisme de Dirac, généralise le concept de fonction d'onde de De Broglie et constitue la représentation mathématique de toute l'information disponible relative à un microsystème. Le vecteur d'état, noté $|\psi\rangle$, vit, comme son nom l'indique, dans un espace vectoriel (de dimension infinie) : l'espace de Hilbert $\mathcal{L}^2(\mathbb{R})$ qui est l'espace des fonctions de carré sommable (c'est-à-dire dont l'intégrale du module carré de la fonction ne diverge pas) et qui a pour propriétés d'être un espace vectoriel sur le corps des complexes, muni d'un produit scalaire hermitien défini positif (existence d'une norme positive).

On considère quelque fois, par souci de simplification, un espace de Hilbert particulier : l'espace des spins (de dimension $2j+1$), qui se réduit à la dimension 2 pour la description des fermions de spin $1/2$. Mais en toute rigueur il s'agit ici d'un sous-espace vectoriel, car, s'il suffit à décrire le spin $1/2$, il manque évidemment les positions et les impulsions, qui, elles, requièrent bien un espace de dimension infinie, dans la mesure où nous avons affaire à des variables continues. La fonction qui détient alors toute l'information disponible pour ce fermion se nomme spin-orbitale et vit bien dans un espace de dimension infinie.

Si la fonction d'onde apparaissait déjà comme un objet théorique (dans la mesure où elle est nécessairement complexe, alors que l'on peut se passer de la notation complexe pour décrire une onde classique et se contenter de séries de sinus et de cosinus ne mettant en jeu que des nombres réels), le vecteur d'état s'éloigne davantage encore de l'espace-temps physique et de nos intuitions sensibles puisqu'il ne prend sens que dans l'espace des fonctions de carré sommable et ne qualifie pas directement les propriétés intrinsèques d'un microsystème mais l'ensemble de l'information disponible sur celui-ci. Celle-ci permettant de connaître les probabilités de mesurer telle ou telle valeur de la grandeur physique que l'on veut observer.

5 Superposition d'états et intrication

Une caractéristique fondamentale relative au vecteur d'état est connue sous le nom de principe de superposition. Celui-ci affirme que si deux états distincts d'un microsystème

sont possibles alors une combinaison linéaire de ces deux états constitue un troisième état possible. Ce principe de superposition a été rendu célèbre par l'image du chat de Schrödinger : si un chat (qui est tout de même un gros microsystème!) peut être vivant ou mort, alors il peut être dans une superposition de ces deux états et donc être à la fois en partie vivant et en partie mort.

Nous comprenons ici que la mesure ne révèle pas une propriété que l'objet posséderait avant l'observation mais qu'elle actualise une (et une seule) des propriétés potentielles contenues dans le vecteur d'état. Ainsi notre chat de Schrödinger n'est pas déjà mort ou déjà vivant avant l'observation, il est dans une superposition de ces deux états, la mesure sélectionnant aléatoirement l'une de ces possibilités.

Mais comment savoir si un microsystème possède ou non une propriété avant l'observation alors que celle-ci est le seul moyen d'accéder à cette propriété? La question de savoir ce qu'est le réel physique lorsqu'on ne l'observe pas paraît insoluble.

Et pourtant une remarquable expérience de pensée, formulée par Einstein, Podolsky et Rosen (1935), va constituer la première des trois étapes nécessaires à la formulation d'une réponse. La seconde est un théorème du physicien irlandais J.S. Bell (1964) qui va rendre possible le passage d'une expérience de pensée à une expérience réalisable. La troisième est la réalisation expérimentale de ce test de Bell réalisée par un physicien français Alain Aspect en 1982.

La conclusion constitue, elle aussi, une propriété extraordinaire du réel quantique (admise par l'interprétation orthodoxe) : non seulement les chats de Schrödinger sont effectivement à la fois morts et vivants avant d'être observés et c'est l'observation qui précipite (au sens du chimiste) le chat dans tel ou tel état bien défini ; mais encore, si nous faisons interagir deux microsystèmes et que nous les séparons spatialement (en prenant soin qu'aucun des deux n'interagisse avec quoi que ce soit d'autre après leur rencontre) ils deviennent inséparables du point de vue de la propriété physique qui les caractérise (celle-là même qui les a intriqués lors de leur interaction). Cette inséparabilité interdit d'écrire pour chacun un vecteur d'état et donc impose que la seule réalité est celle du couple (pour la grandeur physique en question [spin, polarisation,...]). Cette intrication (un seul vecteur d'état pour les deux microsystèmes) peut demeurer même lorsque les deux entités considérées sont spatialement très éloignées l'une de l'autre (143 km par Anton Zeilinger et son équipe en 2012). La mesure d'une propriété sur l'une a une influence instantanée, à distance, sur l'état de l'autre.

Conclusion

Les gammes de manifestations phénoménales incompatibles (complémentaires) d'entités physiques soumises à un questionnement, sous la forme d'une mesure, rendent le 'même' microsystème infiniment différent dans son comportement vis-à-vis de tel ou tel contexte expérimental (dispositif de mesure). Ce surgissement est nécessairement brutal dans la mesure où il ne s'agit pas ici seulement d'une différence (qui pourrait être continûment comblée) mais d'une incompatibilité (orthogonalité des vecteurs d'états) et nous ne savons pas construire une transformation continue permettant de passer de l'un à l'autre (de l'onde à la particule); même s'il est nécessaire d'établir un rapport entre ces deux gammes de phénomènes (nous l'avons vu $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$; $E = \hbar\omega$; le couple de grandeurs énergie et impulsion (E et \mathbf{p}) caractérisent la particule matérielle et la pulsation et le nombre d'onde (ω et \mathbf{k}) caractérisent l'onde).

D'une autre manière encore nous pouvons voir ce passage brutal au 'tout autre'. On lit assez couramment qu'en mécanique quantique la mesure perturbe le phénomène. En réalité une telle affirmation est déjà vraie pour la notion classique de mesure ; ce qui est nouveau en mécanique quantique c'est que la mesure change la nature de la fonction d'onde du microsysteme mesuré (s'il n'est pas dans un état propre). Avant la mesure, celui-ci peut être dans une superposition d'états, après la mesure il ne reste que la valeur propre sélectionnée (pour la grandeur mesurée). Il se produit ce que l'on a coutume de nommer une réduction (du paquet d'onde) et cette réduction produite par la mesure ne consiste pas en une perturbation du phénomène mais en une radicale transformation de son essence. Avant la mesure, la grandeur physique est décrite comme une pluralité de valeurs potentielles existant simultanément (spectre d'observables) et après la mesure, la grandeur physique devient classique (une valeur propre du spectre des observables) c'est-à-dire caractérisée par une seule valeur définie.

Cet infiniment différent est le passage :

- du domaine classique : une seule valeur est obtenue pour le résultat de la mesure car l'objet est dans état défini pour cette grandeur physique, celle-ci est une propriété de l'objet (que nous la mesurons ou non).
- au monde quantique où les grandeurs physiques sont devenues des opérateurs, l'opérativité se traduisant par le fait nouveau que la grandeur physique n'est plus une propriété passive de l'objet mais devient un acteur. La grandeur physique agit (sur la fonction d'onde) et peut, ou doit, prendre de multiples valeurs différentes simultanément (états superposés).

Le passage du monde classique, dans lequel les chats sont morts ou vivants, au monde quantique, dans lequel les chats peuvent être morts et vivants, nous invite à repenser la frontière entre ces mondes (et le rôle de la constante de Planck), les notions de phénomène physique, d'identité du même, de mesure (instruments et processus), de système isolé, de réalité physique (comme potentialités, comme actualisations), de cadre spatio-temporel, voire même de conscience de l'observateur, d'unicité ou de multiplicité d'univers, etc.

Cet infiniment différent offre une richesse considérable, au-delà des apories qu'il semble manifester, et le physicien est conduit à examiner en philosophe les fondements, les procédures et les fins de son activité.