

NOTRE CONNAISSANCE DU MONDE MICROSCOPIQUE

AGUSTIN PALACIOS-LALOY

Tout d'abord qu'est-ce que j'entends par *physique microscopique* ? Est-ce une physique des petits objets ? Mais les grands objets sont aussi formés de petits composants... La distinction n'est pas tant une question d'échelle, mais un problème lié à l'importance des interactions. La physique microscopique est donc la physique de systèmes simples –électrons, atomes, photons, *simples* au sens où ils sont indivisibles à notre échelle d'énergies– et qu'ils sont suffisamment peu nombreux pour que leurs interactions mutuelles restent calculables.

Les lois quantiques qui gouvernent ces objets simples sont toutes autres que celles qui régissent la réalité accessible à nos sens, la réalité *macroscopique*. Elles troublent notre intuition : un même électron peut se trouver en deux lieux en même temps, deux atomes peuvent former une seule réalité indivisible, même s'ils sont chacun à un bout de l'univers. Ces exemples du principe de superposition et de l'intrication –je reviendrai là dessus– sont difficilement concevables. Niels Bohr disait bien *si vous n'êtes pas troublés par la mécanique quantique, c'est que vous n'y avez rien compris*.

Ce trouble est d'autant plus naturel que le monde microscopique est beaucoup plus lointain de notre échelle que ce que nous réussissons à imaginer. L'air qui nous entoure est une assemblée de nombreux atomes : mais imaginons-nous qu'ils sont si nombreux qu'à chacune de nos inspirations nous absorbons une vingtaine des atomes que Jules César expira en disant son *Tu quoque fili* ?

Ce double éloignement -conceptuel et en échelle- rend le travail du physicien ardu. Découvrir les signaux quasi-intangibles dans une forêt de bruit, construire une intuition à la frontière de l'exprimable : l'expérimentateur comme le théoricien perdent leurs certitudes, s'ouvrent à l'étonnement. S'en suit un regain de modestie : on est loin de prétendre comme le prétendait Lord Kelvin que la physique est presque finie ; non seulement nous connaissons qu'une partie des mécanismes qui gouvernent les systèmes microscopiques, mais même pour ceux que nous connaissons, il nous est souvent impossible de prédire le comportement d'objets composés d'un grand nombre de constituants. La variété de formes que nous offre la nature même dans ses composées les plus simples est étonnante : la chimie est un immense catalogue des formes d'organisation de quelques constituants élémentaires : une centaine de noyaux et leurs cortèges électroniques donnent lieu aux formes les plus exotiques. Et –c'est encore plus admirable– ces quelques constituants élémentaires –électrons et noyaux– obéissent tous aux mêmes lois extrêmement simples.

Ces lois, énoncées dès les années trente par quelques grands esprits –Heisenberg, Schrödinger, Dirac– tiennent toutes entières dans quatre postulats, théorie qui a été capable d'expliquer tous les phénomènes observés jusqu'à ce jour avec une précision remarquable. Au risque de devenir aride j'aimerais donc parler un peu de ces postulats.

Un premier postulat dit qu'une particule est décrite comme un état ou une combinaison de plusieurs états. Prenons le cas d'une molécule d'ammoniac, l'atome d'azote a deux positions stables : à gauche ou à droite du plan formé par les trois hydrogènes. Il peut donc être décrit comme gauche, droite ou une somme pondérée de gauche et de droite. Si c'est ce dernier cas il a une certaine probabilité d'être à gauche, une certaine probabilité d'être à droite. Vous direz : et alors, ne pouvions nous pas déjà en physique classique traiter des cas où on a une certaine *incertitude* sur les paramètres du système. Bien sûr que si, mais entendons-nous bien : dans ces états quantiques dits superposés il ne s'agit pas d'absence de connaissance de notre part : c'est l'azote qui en quelque sorte n'a pas décidé où il est. et qui se comporte un peu comme s'il était *des deux côtés*, jusqu'à ce qu'on mesure, on le trouve alors de l'un ou de l'autre côté, avec une certaine probabilité. Cela vous semble-t-il flou ? Pourtant une expression mathématique décrit précisément cet état, et toutes les prédictions faites à partir de celle-ci sont en parfait accord avec la réalité. Plus qu'aux limites de la réalité on touche à celles de notre *bon sens* d'êtres macroscopiques.

Vous l'aurez sans doute aussi remarqué : la description de la réalité quantique est intrinsèquement probabiliste. Imaginez un noyau de nobelium 250 avec une demie-vie de $3,7 \mu\text{s}$. Au bout de ce temps il a une chance sur deux d'avoir émis une particule alpha. Mais peut-on savoir *quand* est-ce qu'il va émettre ? Non selon la mécanique quantique il n'y a rien qui puisse le dire. De nouveau je cite Niels Bohr : *les prédictions sont difficiles, surtout en ce qui concerne l'avenir.*

Cette nature probabiliste ré-ouvre la possibilité d'une vision du monde plus humaine, plus divine. La liberté, la providence n'ont plus à rentrer dans le carcan d'une explication du monde déterministe, qui exclurait toute inflexion de la réalité. Le monde n'est plus un horloge dont le comportement ne fait que développer un réglage initial.

Continuons le tour des postulats : un autre postulat indique la description mathématique à suivre pour un système formé par plusieurs objets simples. Celle-ci autorise des états dits intriqués, où l'état cesse d'être quelque chose de propre à chaque constituant du système, et devient une propriété de l'ensemble. Pour des systèmes intriqués on ne peut plus comprendre le comportement d'un tout en prenant chacune de ses parties séparément : le système n'est plus séparable. On peut préparer un état entre des spins de façon que si l'un pointe vers le haut, l'autre pointe vers le bas et vice-versa. Maintenant quand on les mesure on trouve toujours des résultats opposés, rien de surprenant on peut faire la même chose en mécanique classique. Mais ce qui est surprenant c'est que même si on les mesure selon un autre axe, par exemple à 45 degrés de la verticale les résultats continueront à être corrélés.

Finalement, et je me rapproche de la thématique de ce séminaire, deux postulats parlent de l'évolution temporelle des états. Le premier décrit l'équation d'évolution d'un état, l'équation de Schrödinger, une équation aux dérivées partielles toute semblable à celles de la physique classique.

Le deuxième est le postulat qui décrit la mesure : il dit quelle est la probabilité de mesurer chaque état pour un état superposition et affirme que juste après la mesure la superposition est détruite et ramenée à ce qui a été mesuré. Ceci ouvre de nombreuses questions : pourquoi y a-t-il deux formes d'évolution, ne peut-on pas expliquer la mesure par une équation à la Schrödinger ? Pourquoi n'observons-nous pas à notre échelle d'états superposition ? Y-a-t-il destruction d'information à la mesure ? Cette destruction d'information donne-t-elle une raison pour pas la flèche du temps, c'est à dire le fait que le temps avance toujours ?

En fait la physique actuelle tente de répondre à toutes ces questions dans le cadre de la théorie de la décohérence.

La façon d'envisager un instrument de mesure dans celle-ci est en forme d'un bain d'oscillateurs, c'est à dire un grand ensemble de systèmes oscillants. Ces systèmes se comportent en moyenne de la même façon mais fluctuent chacun de leur manière. La façon dont la mesure s'opère est la suivante. Premièrement le système mesuré s'intrique au bain. Deuxièmement la variation des fluctuations entre les différents oscillateurs exerce une action sur le système global consistant à générer une évolution très rapide vers quelques états, dits pointeurs, qui sont les seuls états stables de cette évolution, qui ont la propriété d'être des états séparables de l'ensemble bain+système. En même temps l'état final du bain reflète (ou non) par une de ses propriétés moyennes le choix d'un parmi les pointeurs.

Pensez par exemple à une mesure de position faite à l'aide d'un faisceau de photons -ce qu'on appelle un laser. Le faisceau est dans ce cas un bain composé d'un grand nombre de photons partageant une phase et amplitude communes, mais avec des fluctuations autour de celles-ci. Tandis que la phase de faisceau va extraire l'information de position, la même quantité d'information va être détruite par les fluctuations.

Bien qu'elle ne soit qu'à l'état d'ébauche la valeur de cette théorie de la décohérence me semble immense. Premièrement elle montre qu'un instrument de mesure n'a pas de propriétés particulières qui seraient liées au fait qu'il livre un résultat de mesure, un élément d'information à notre échelle. On peut parfaitement imaginer des systèmes ayant le même rôle de faire choisir un état à une superposition, mais incapables de livrer un résultat : par exemple la position une particule délocalisée est localisée lorsqu'elle est plongée dans un fluide, par l'effet du mouvement brownien. Par contre il est impossible de délivrer un résultat sans perturber le système.

La théorie de la décohérence montre deux choses. D'une part la réalité classique émerge de la réalité quantique grâce au phénomène le plus quantique de tous : l'intrication. La réalité est forcée de « choisir » un état parmi une superposition, de devenir quelque chose, par une interaction étroite avec les fluctuations, avec le désordre. C'est un phénomène qui rappelle les phénomènes d'auto-organisation, faisant naître des structures ordonnées dans des processus dynamiques chaotiques. Il y a des auteurs qui voient la vie comme un phénomène de ce genre. La théorie de la décohérence va bien au delà : le monde macroscopique tel que nous le connaissons naît d'un ensemble de type de phénomènes.

C'est aussi dans ce contexte qu'on retrouve la flèche du temps en mécanique quantique qui est caractérisée par le passage d'information de degrés de liberté collectifs vers des degrés de liberté de plus en plus individuels et microscopiques, et donc essentiellement impossibles à contrôler. La physique microscopique aujourd'hui admet de plus en plus de façon d'envisager la réalité est en termes d'information. La physique qui était une science du matériel, de ce qu'on touche, devient de plus en plus un étude sur les transferts d'information, de flux intangibles.