

# Cette étonnante mécanique quantique

Alain Aspect

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Unité Mixte CNRS 8501

et

Ecole Polytechnique

Monsieur le Président, Monsieur le Chancelier,  
Madame et Monsieur les Secrétaires perpétuels,  
Chères consoeurs, Chers confrères,  
Mesdames, Messieurs,  
Chers amis,

La Mécanique Quantique est vraiment étonnante !

Je l'ai découverte pour ma part – sous sa forme moderne – en 1973, alors que j'étais coopérant au Cameroun. Le livre de Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, et Franck Laloë, venait de sortir, et pour quelqu'un formé à la physique classique, le choc était beaucoup plus violent que lorsque j'avais abordé la relativité. Impossible de passer graduellement des concepts classiques aux concepts quantiques. En revanche, une fois les postulats acceptés, je disposais d'un formalisme cohérent s'appliquant à des situations qui m'avaient troublé depuis que je m'intéressais à l'optique : je pouvais enfin décrire ce qui arrive à un photon tombant sur une lame semi-réfléchissante. Certes, toute difficulté n'était pas aplanie : comment se représenter avec des images de notre monde, un objet unique – le photon – simultanément présent en deux points de l'espace, les deux voies de sortie de la lame semi-réfléchissante ? Au moins, la connaissance du formalisme quantique me permettait-elle de mieux cerner les motifs d'étonnement, de le relier à la question de la dualité onde-particule, et de constater que ce formalisme prédisait de façon non ambiguë le résultat de chaque expérience envisagée.

Un étonnement encore plus grand allait me saisir lorsque je pris connaissance, sur la suggestion de Christian Imbert qui allait parrainer ma thèse d'état, du célèbre article de John Bell dans lequel sont écrites pour la première fois les fameuses inégalités qui portent aujourd'hui le nom d'« Inégalités de Bell ». Cet article montre que deux particules dans un état quantique « intriqué » (on dit aussi « enchevêtré »), du type introduit par Einstein Podolsky et Rosen, présentent des comportements tellement parallèles, qu'il n'existe aucun modèle classique permettant de rendre compte de ces corrélations : les inégalités de Bell établissent une frontière quantitative entre les comportements classique et quantique, rendant possible un test expérimental. En 1975 on ne disposait pas de résultats expérimentaux permettant de trancher irréfutablement. Stimulés par le travail de pionnier de Clauser, Pipkin, Fry, et leurs collaborateurs, et encouragés notamment par Franck Laloë, nous avons construit à Orsay une expérience dont le cœur était une nouvelle source de paires de photons intriqués, utilisant la méthode d'excitation laser à deux photons qui venait d'être développée en France par Bernard Cagnac et Gilbert Grynberg. Avec Philippe Grangier, Gérard Roger, et Jean Dalibard, je pus mener à bien au début des années 1980 une série d'expériences se rapprochant de plus en plus de la GedankenExperiment, expérience de pensée idéale support des discussions théoriques. Le résultat fut sans appel : la violation indiscutable des inégalités

de Bell montra qu'il est impossible d'interpréter le parallélisme des comportements des photons intriqués comme on le fait pour les jumeaux humains, dont les patrimoines génétiques identiques permettent d'expliquer les corrélations entre les caractères physiques comme la couleur des yeux, ou les profils médicaux. Les photons intriqués jumeaux ne sont pas deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un ensemble de paramètres, dont la connaissance serait suffisante pour expliquer les corrélations. Une paire de photons intriqués doit en fait être considérée comme un système unique, *inséparable*, décrit par un état quantique global, impossible à factoriser en deux états relatifs à chacun des deux photons. Cette inséparabilité se manifeste même si les deux photons sont très éloignés l'un de l'autre, et même si leur intervalle est du genre espace – au sens relativiste, c'est à dire qu'aucune interaction ne peut se propager entre eux à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière. Dans nos expériences de 1982, les photons étaient séparés d'une dizaine de mètres au moment de la mesure. Dans les expériences récentes, où des sources d'un nouveau type permettent d'injecter les photons intriqués dans deux fibres optiques partant dans des directions opposées, le caractère inséparable a pu être observé à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. S'il faut en croire les écrits d'Einstein, nul doute que ces résultats l'auraient plus qu'étonné.

Avec un montage modifié, notre source de photons allait nous permettre de revenir au problème de la dualité onde-particule, à l'occasion de la thèse d'état de Philippe Grangier. Il fut en effet possible d'en extraire des paquets d'onde à un seul photon, de les envoyer un par un sur une lame semi-réfléchissante, et d'observer les signaux sur deux compteurs de photon placés dans les deux voies de sortie de la lame. Pour une particule unique indivisible, qui est soit transmise soit réfléchi, on n'attend aucune détection simultanée. Au contraire, pour une onde, qui se divise en deux, on s'attend à observer des détections simultanées dans les voies transmise et réfléchi. L'expérience avec nos paquets d'onde à un seul photon montra un comportement corpusculaire non ambigu : la détection avait lieu soit dans la voie transmise, soit dans la voie réfléchi, pas dans les deux à la fois. Quoi d'étonnant me direz-vous dans le fait qu'un seul photon aille soit d'un côté soit de l'autre ? Attendez la fin de l'histoire. Quand nous avons ôté les détecteurs, et recombina les trajets optiques avec une deuxième lame semi-réfléchissante, pour former un interféromètre de Mach-Zehnder, nous avons observé des interférences. Or on ne sait pas interpréter ces interférences sans admettre que le paquet d'onde à un seul photon se comporte comme une onde, c'est à dire se coupe sur la première lame en deux paquets d'onde qui suivent simultanément les deux voies, puis se recombina. Et pourtant, il s'agit des mêmes paquets d'onde à un photon que ceux de la première expérience, pour lesquels nous avons constaté un comportement de particule, allant soit d'un côté soit de l'autre, mais en aucun cas des deux côtés à la fois. Alors onde ou particule ? Les deux bien, sûr, mais quatre vingt ans après de Broglie, la dualité onde-particule est toujours aussi étonnante.

Je pourrais vous raconter bien d'autres histoires étonnantes. Comment, avec Claude Cohen-Tannoudji, et plusieurs collaborateurs dont beaucoup sont ici aujourd'hui, nous avons réussi à refroidir des atomes à des températures incroyablement basses, en les mettant dans un état où chaque atome peut se retrouver simultanément en deux points de l'espace séparés par une distance de l'ordre du centimètre. Comment, avec mes collaborateurs du groupe d'optique atomique d'Orsay, nous avons réussi à étudier la rugosité d'une surface à l'échelle du dixième de nanomètre, en y faisant rebondir des atomes se comportant non comme des particules mais comme des ondes de matière. Comment nous rêvons de répéter ces expériences avec les lasers à atomes que nous commençons à maîtriser. Comment nous pouvons observer en temps réel la naissance et la mort d'un condensat de Bose-Einstein. Dans toutes ces expériences, si on

sait ne pas être blasé, la première réaction est toujours *l'étonnement*. Mais ensuite, il y a un deuxième sentiment que j'espère vous avoir fait partager : c'est *l'émerveillement* devant la subtilité de ces phénomènes, et devant la puissance de cette mécanique quantique qui permet non seulement de les décrire, mais aussi, après quatre vingts ans de bons et loyaux services, de toujours en découvrir de nouveaux.

Paris, le 17 juin 2002