

Des concepts aux applications : les deux révolutions quantiques

Élisabeth Giacobino (elg@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

La physique quantique, née au début du XX^e siècle, a introduit de nouveaux concepts qui aident à comprendre notre environnement à très petite échelle. Elle est souvent considérée comme étrange, mais repose, comme les autres domaines de la physique, sur un formalisme mathématique qui rend possible de décrire parfaitement les faits observés, et aussi de prédire ce qui va se passer. Transistors, lasers et circuits intégrés sont des dispositifs de notre vie de tous les jours qui ont été inventés grâce à la physique quantique.

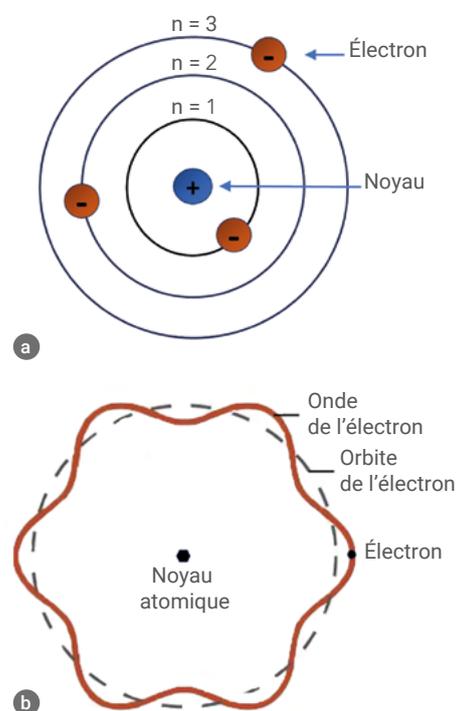
Cet article est le résumé d'une conférence donnée par Alain Aspect (prix Nobel de Physique 2022) le 2 avril 2024 à l'Espace des Sciences de Rennes.

Il y a eu deux révolutions quantiques. La première révolution quantique apparaît au début du XX^e siècle avec la quantification de l'énergie, qui ne peut prendre que certaines valeurs discrètes à l'échelle des particules, et la dualité onde-particule, qui indique qu'à cette même échelle, toute particule est associée à une onde et réciproquement. Einstein, qui a apporté une contribution majeure à la première révolution quantique, lance la deuxième en 1935 avec un article qui pose la question de l'intrication, avec deux particules qui sont dans des états corrélés, c'est-à-dire qu'on ne peut pas modifier l'un sans aussi modifier l'autre, et avec une corrélation qui persiste à longue distance. Cette propriété ne sera étudiée que dans la deuxième moitié du XX^e siècle après le développement des outils expérimentaux nécessaires.

Max Planck en 1900 et Albert Einstein en 1905 posent les jalons de la première révolution quantique. Einstein montre que la lumière, décrite classiquement par des ondes, avec un formalisme reconnu par tous, doit aussi être considérée comme formée de particules qui ont une énergie

bien définie, les photons. La lumière est donc à la fois une onde et un ensemble de particules.

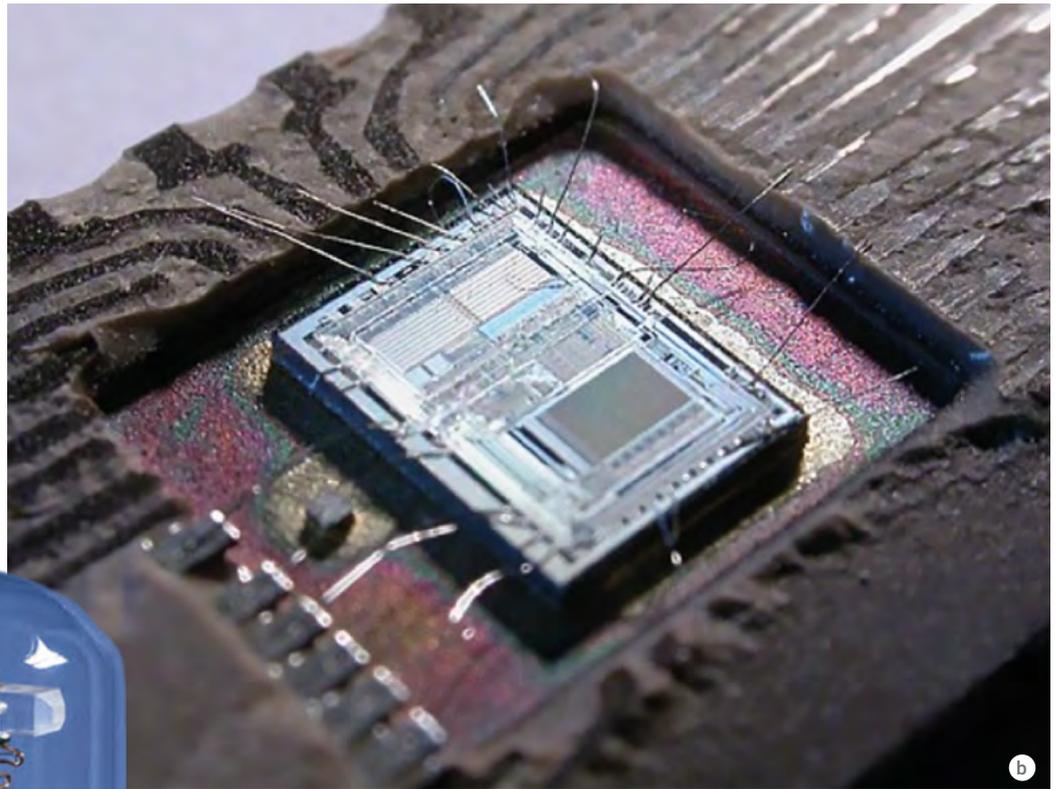
Le même type de propriété va apparaître pour la matière. En 1913, Niels Bohr explique le spectre lumineux de certains atomes, qui n'est pas uniforme mais comporte des raies de longueur d'onde bien définies, par le fait que les électrons tournent autour du noyau sur des orbites discrètes, et que quand l'électron saute d'une orbite à l'autre il émet un grain d'énergie bien définie : un photon. Cette règle, posée de façon *ad hoc* par Bohr comme conséquence de son postulat sur la quantification du moment cinétique de l'électron, va plus tard s'expliquer par la dualité onde-corpuscule pour les particules de matière, énoncée en 1923 par Louis de Broglie. Les orbites quantifiées des électrons sont déterminées par le fait que l'électron est aussi une onde, et que quand l'électron tourne autour du noyau, il ne peut y avoir qu'un nombre entier de longueurs d'onde sur la trajectoire, ce qui limite le nombre des orbites possibles, comme cela est illustré sur la figure 1.



1. Les niveaux d'énergie des atomes sont quantifiés.

(a) Cela vient du fait que seules certaines orbites des électrons autour du noyau atomique sont permises.

(b) L'électron est aussi une onde et sa trajectoire sur l'orbite atomique doit comporter un nombre entier de longueurs d'onde.



2. L'histoire du transistor.

- (a) Réplique du premier transistor inventé à Bell Labs en 1947.
 (b) Circuit intégré (Intel), qui contient des milliards de transistors.

Sources : Wikipedia.

“
 La première
 révolution
 quantique permet
 de comprendre
 la structure de la
 matière, sa stabilité,
 ses propriétés
 mécaniques et
 électriques,
 ses interactions
 avec la lumière.
 ”

Cette théorie de la dualité onde-corpuscule pour les particules de matière est confirmée peu après par des expériences de diffraction des électrons. Deux ans plus tard, en 1925, Erwin Schrödinger écrit l'équation publiée en 1926 qui porte son nom et qui régit l'évolution de cette fonction d'onde pour un système quantique non relativiste. Cette équation, toujours utilisée à l'heure actuelle, représente une étape remarquable dans le développement de la mécanique quantique. La première révolution quantique permet de comprendre la structure de la matière, sa stabilité, ses propriétés mécaniques et électriques, ses interactions avec la lumière, et aussi des propriétés exotiques à basse température pour des objets macroscopiques, telles que la superfluidité ou la

supraconductivité. Grâce au contrôle de la matière à très faible dimension et à la dualité onde-particule, elle a suscité une révolution technologique, avec de nouveaux composants électroniques, et une nouvelle ère de la communication et de l'information, comme le montre la figure 2 pour le transistor. On peut comparer l'importance de cette révolution à celle due à la machine à vapeur au XIX^e siècle.

La seconde révolution quantique est basée sur le phénomène d'intrication, analysé par Albert Einstein en 1935, dans un article publié avec Boris Podolsky et Nathan Rosen dans le journal *Physical Review*. Cet article suscite de fortes controverses, en particulier entre Albert Einstein et Niels Bohr. C'est seulement en 1964 que John Bell propose un théorème qui ouvre la voie à un test expérimental.

On considère des paires de photons « intriqués » en polarisation. Ce sont des photons dont chacun peut être dans un état de polarisation verticale ou horizontale, et sur lesquels on fait des mesures de polarisation. Si on trouve que le photon 1 a

>>>

“
L'intrication [quantique] est à la base des nouvelles technologies de communication et de cryptographie quantique, et aussi de la téléportation [...]
 elle est aussi le concept de base de l'ordinateur quantique.
 ”

>>>

une polarisation verticale, le photon 2 est lui aussi trouvé avec une polarisation verticale, alors que quand le photon 1 est trouvé avec une polarisation horizontale, le photon 2 est lui aussi trouvé avec une polarisation horizontale. Si on mesure les polarisations de deux photons de paires différentes, c'est comme si on jouait à pile ou face, on a une chance sur deux de trouver une polarisation ou l'autre.

Mais si on mesure les polarisations des deux photons de la même paire, avec le montage expérimental illustré par la figure 3, on trouve toujours la même polarisation pour les deux photons. Les résultats aléatoires sont donc complètement corrélés, mais on ne peut pas connaître l'état de chaque photon au moment où il est émis, car l'état d'un système quantique avant la mesure n'existe pas. C'est ce que prévoit la mécanique quantique et que soutient Niels Bohr.

Einstein au contraire pense que des résultats corrélés ne peuvent provenir que de valeurs bien déterminées de la polarisation des photons dès qu'ils quittent la source, et conclut donc qu'il existe des variables « cachées » supplémentaires.

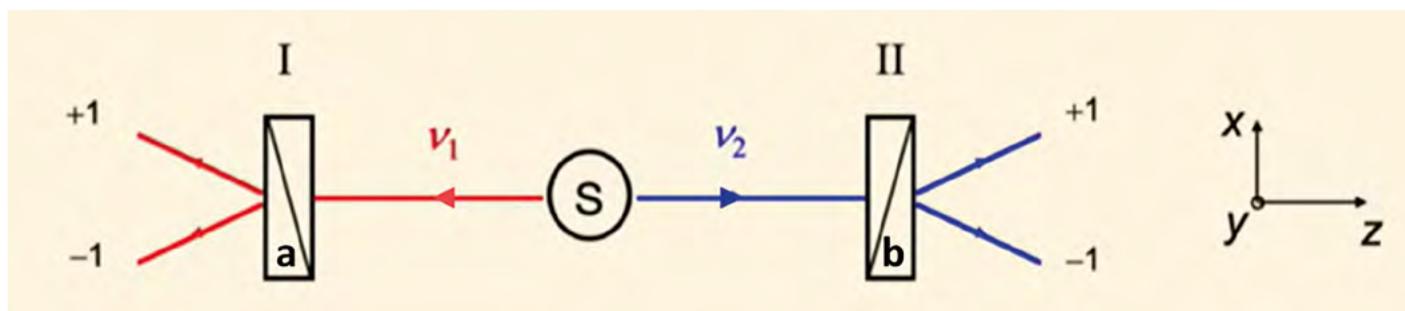
La résolution de cette controverse fondamentale sera rendue expérimentalement possible par John Bell, qui, dans son article de 1964, établit une formule qui prévoit des résultats expérimentaux différents dans les deux cas.

Après les expériences pionnières de John Clauser en 1972-1976 qui donnent un résultat positif pour les prévisions de la mécanique quantique, mais dans des

conditions un peu imparfaites, où la distance entre les mesures n'est pas assez grande, Alain Aspect monte une expérience en 1975-1982 avec une source de photons intriqués très efficace, schématisée sur la figure 3 et un système de mesure qui permet de changer la polarisation mesurée pendant la propagation des photons. Il trouve des polarisations complètement corrélées entre les deux photons, même lorsque la mesure du premier photon est faite après qu'il ait quitté la source et que les photons sont éloignés l'un de l'autre.

De plus les mesures sont faites à des endroits où les photons sont assez loin l'un de l'autre pour que rien ne puisse les connecter, sauf à aller plus vite que la lumière, ce qui est impossible. Cela veut dire que les photons restent corrélés instantanément à longue distance, et que la mesure du photon 1 modifie instantanément l'état du photon 2. Il faut donc abandonner le réalisme local, c'est-à-dire l'indépendance des réalités physiques présentes dans des volumes très distants l'un de l'autre.

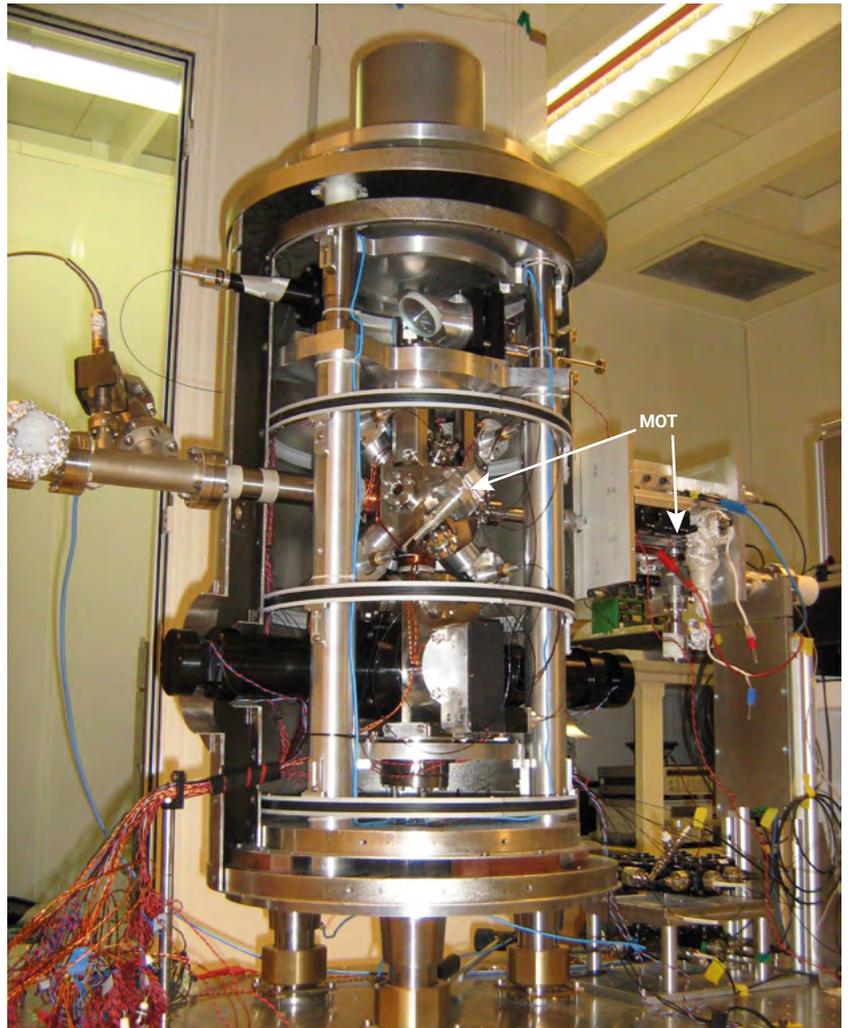
Cette propriété complètement nouvelle a donné lieu à une nouvelle génération de technologies quantiques. Il y a un peu plus de 30 ans, l'intrication quantique a été proposée par Artur Ekert pour des transmissions complètement sécurisées. Deux correspondants à distance ont besoin de séries identiques de nombres aléatoires pour coder et décoder le message qu'ils vont échanger. Les clés identiques sont distribuées par des photons intriqués sur lesquels on mesure la même polarisation. Pour la réception de chaque photon, les



3. Schéma de l'expérience d'intrication réalisée par Alain Aspect en 1975-1982. Elle comprend des sources de paires de photons (S), qui sont des atomes émettant chaque fois deux photons en cascade. Il y a plusieurs cascades possibles, où les paires de photons suivent des chemins différents, l'un où ils ont tous les deux la même polarisation horizontale, l'autre où ils ont tous les deux la même polarisation verticale. Les photons peuvent donc avoir des polarisations différentes d'une fois sur l'autre, mais ils sont « intriqués » et les photons de chaque paire ont toujours la même polarisation. Cette polarisation peut aussi être une superposition de polarisation horizontale et verticale. Les deux photons de chaque paire (v_1 et v_2) sont ensuite dirigés dans des directions différentes, où leurs polarisations sont mesurées par les polariseurs I et II, qui peuvent être orientés dans les directions a et b.

correspondants changent l'orientation de leur polariseur au hasard entre les deux valeurs possibles. Ils échangent ensuite par téléphone sur cette orientation et ne gardent que les cas où ils avaient la même orientation des polariseurs. Toute tentative d'espionnage, où un photon serait détecté par un espion et renvoyé dans le circuit, provoque des erreurs puisque l'espion ne sait pas quelle polarisation mesurer et ces erreurs sont un indice de la présence de l'espion. Cette intrication est à la base des nouvelles technologies de communication et de cryptographie quantique, et aussi de la téléportation, que nous ne détaillerons pas ici, mais qui repose aussi sur le transfert d'état quantiques à l'aide de systèmes intriqués.

L'intrication est aussi le concept de base de l'ordinateur quantique, proposé par Richard Feynman en 1982. Au lieu des *bits* classiques 0 et 1, un ordinateur quantique utilise des *qubits*, superpositions de 0 et de 1, qui, de plus, sont intriqués, ce qui donne une perspective de puissance de calcul considérable et des possibilités de calculs massivement parallèles. Cependant, des problèmes importants, comme la décohérence due à l'environnement des *qubits*, doivent encore être résolus pour que l'ordinateur quantique fonctionne parfaitement. Actuellement, des systèmes encore imparfaits permettent d'obtenir des résultats non atteignables avec un ordinateur



Crédit photo : Arnaud Landragin et Sébastien Merlet.

4. Gravimètre absolu (Unité mixte de recherche Syrte, Observatoire de Paris). Ce gravimètre repose sur l'interférence d'atomes de rubidium, qui sont refroidis à 2,5 mK dans des pièges magnéto-optiques (MOT), puis qu'on laisse ensuite tomber en chute libre. Ceci permet de mesurer la constante de gravitation g avec une précision jamais atteinte.



©wikipedia

Niels Bohr (1885-1962) en 1922.

classique, comme par exemple la simulation de nombreux systèmes impossibles à modéliser numériquement, l'étude de la fonctionnalité de grosses molécules pour la pharmacie, ou la résolution de problèmes d'optimisation dont la taille augmente exponentiellement avec le nombre d'objets, comme le problème du « voyageur de commerce ».

Les nouvelles technologies quantiques reposent sur le contrôle individuel des objets quantiques, comme les atomes, les ions ou les photons, et aussi d'objets quantiques artificiels, pour la métrologie et les capteurs. Les nanocristaux de diamant sont déjà largement utilisés en biologie et en médecine pour mesurer les propriétés des cellules. Le gravimètre quantique, montré sur la figure 4, qui utilise l'inter-

férométrie atomique de haute précision avec des atomes ultra-froids en chute libre, permet de mesurer la gravité avec une précision jamais atteinte, par exemple pour suivre ses variations au voisinage d'un volcan et prévoir les éruptions.

Ce ne sont que quelques exemples des nouvelles technologies quantiques ; de nombreuses *start-ups* et aussi de grandes sociétés industrielles travaillent sur le sujet. Les prochaines découvertes pourraient aussi avoir un impact sociétal important sur la croissance économique, notamment dans les télécommunications, sur la biologie et la santé, sur la production d'énergie avec de nouvelles sources plus efficaces ou sur le climat avec une meilleure surveillance et une meilleure compréhension de son évolution. ■