

Nous avons présenté dans le numéro 225 de notre Bulletin l'ouvrage collectif *DEMAIN, LA PHYSIQUE* édité par Odile Jacob-Sciences (ISBN 2-7381-1458-X), où dix physiciens français de grande renommée, réunis à l'initiative de l'Académie des sciences, pour l'Année Mondiale de la Physique, nous font partager les extraordinaires avancées de la physique moderne. Parmi eux, dans le Chapitre 5, Alain ASPECT (A'1 65) décrit "Une nouvelle révolution quantique". Nous remercions l'éditeur, Odile Jacob et l'auteur, Alain ASPECT de nous autoriser à publier ici de larges extraits de ce chapitre, en deux parties, la première dans le présent bulletin et la seconde dans le suivant (Bulletin 227).

UNE NOUVELLE RÉVOLUTION QUANTIQUE (1)

Le développement de la physique quantique, au XX^{ème} siècle, est l'une des aventures intellectuelles les plus extraordinaires de toute l'histoire humaine. Cette théorie physique a modifié de fond en comble notre conception du monde, puisqu'elle nous force, par exemple, à accepter qu'une particule puisse se trouver à la fois ici et là, ou qu'une porte quantique puisse être à la fois ouverte et fermée. Et elle a tout autant bouleversé notre mode de vie puisque ses applications sont innombrables : lasers, transistors, circuits intégrés, composants de base des technologies de l'information et de la communication...

Une telle accumulation de succès aurait pu laisser craindre un épuisement du domaine : il n'en est rien. Qu'il s'agisse du comportement des électrons dans les solides, objet de recherches particulièrement intenses, ou de l'interaction lumière matière, ou des fluides quantiques ultrafroids, dans tous ces domaines et dans bien d'autres encore, on voit apparaître des phénomènes, certes compréhensibles dans le cadre de la physique quantique, mais tellement nouveaux et inattendus que l'intérêt rebondit sans cesse, ponctué par l'attribution de nombreux prix Nobel.

De façon sans doute encore plus imprévue, tant était grand le sentiment que « les pères fondateurs » (Niels Bohr et ses élèves) avaient totalement clarifié le sujet (essentiellement en répondant aux objections d'Einstein), c'est au niveau du cœur conceptuel de la théorie quantique qu'une nouvelle phase de progrès majeurs a débuté en 1960 avec les travaux de John Bell, suivis d'expériences de plus en plus fines. La violation des inégalités de

Bell a apporté l'évidence irréfutable de l'inséparabilité quantique, propriété extraordinaire d'une paire d'objets intriqués qui se comportent comme un système quantique unique, même si les deux objets sont très éloignés l'un de l'autre.

C'est à la même époque que l'on a appris à manipuler un par un des électrons, des ions, des atomes ou des photons, et on a pu observer directement les « sauts quantiques », évolutions brutales du système à des instants aléatoires. Cette notion, que l'on avait longtemps cru réservée aux discussions de principe sur les objets quantiques individuels, était loin d'être unanimement acceptée, tant était révolutionnaire l'idée de discontinuités soudaines et imprédictibles dans l'évolution d'un système. On sait aujourd'hui que la mécanique quantique s'applique avec succès aux objets uniques, et pas seulement de façon statistique à de grands nombres d'objets identiques comme les atomes d'une gaz, et on a vu apparaître de nouvelles méthodes de calcul, dites de « Monte-Carlo quantique », bien adaptées à la description du comportement de ces objets quantiques élémentaires individuels.

Il n'est sans doute pas exagéré de dire que ces deux avancées conceptuelles de la fin du XX^{ème} siècle – la compréhension de l'importance des états intriqués, la compréhension de la dynamique des objets quantiques individuels – signent le début d'une nouvelle révolution quantique. Et il n'est pas interdit d'imaginer qu'au delà des progrès en physique fondamentale dont nous n'avons sans doute observé que les prémices, et des questions épistémologiques

d'interprétation qui restent plus ouvertes que jamais, cette nouvelle révolution quantique pourrait à son tour bouleverser notre société en débouchant sur une nouvelle révolution technologique, la révolution de l'information quantique...

LA PREMIÈRE RÉVOLUTION QUANTIQUE

Deux théories révolutionnaires ont vu le jour au début du XX^{ème} siècle, la relativité et la mécanique quantique. Il est bien connu que la relativité a fortement remis en cause notre vision du monde (relativité du temps, équivalence masse-énergie), et qu'elle a conduit à une application aux conséquences immenses pour l'humanité, la maîtrise de l'énergie nucléaire. Mais la mécanique quantique a exigé des révisions conceptuelles encore plus déchirantes, indispensables pour comprendre la structure de la matière à des échelles de plus en plus petites (liaison chimique, atome, noyau, particules élémentaires). On sait peut-être moins que ce sont des applications directes de la physique quantique, la micro-électronique et l'optoélectronique, qui ont permis le développement des technologies de l'information et de la communication qui ont déjà bouleversé nos sociétés.

Le premier mérite de la mécanique quantique – et non le moindre – est d'avoir élucidé la structure et les propriétés apparemment les plus banales (chimiques, électriques, mécaniques, thermiques) de la matière qui nous entoure. Auparavant, on ne savait pas expliquer pourquoi la matière est stable, alors qu'elle est formée de charges électriques de signes

opposés qui auraient dû, en s'attirant, émettre du rayonnement et aboutir à l'effondrement de la matière sur elle-même. C'est à Niels Bohr que revient le mérite d'avoir compris en 1913 qu'il fallait une approche radicalement nouvelle, la quantification, pour surmonter cette difficulté majeure. Dès 1925, Heisenberg avait compris que vouloir confiner les charges coûte de l'énergie, ce qui empêche la matière de s'effondrer sur elle-même. En moins de deux décennies, la mécanique quantique allait donner une compréhension profonde et quantitative des propriétés de la matière, permettant le calcul des coefficients de conductivité électrique ou thermique, des coefficients d'élasticité, ou encore celui des énergies de liaison, toutes grandeurs qui avaient été introduites empiriquement en physique et en chimie classiques.

Mais la mécanique quantique a aussi permis de comprendre des propriétés beaucoup plus exotiques de la matière : la supraconductivité, c'est-à-dire la disparition de la résistivité



Fig.1. Fontaine d'hélium superfluide. Cette photo montre l'hélium superfluide jaillissant du récipient dans lequel il se trouve, à travers un « bouchon » poreux. Dans un superfluide tel que l'hélium liquide en dessous de 2 degrés absolus, une augmentation locale de la température crée une surpression qui est susceptible de faire jaillir le liquide dont la viscosité est quasi-nulle. C'est la découverte de cet « effet fontaine » par J.F. Allen et H. Jones en 1938 qui poussa F. London à admettre que l'hélium liquide possède une phase « condensée » du type prévu par Bose et Einstein. Soixante-cinq ans plus tard, après de nombreuses controverses, il est généralement admis que London avait raison, bien que les atomes d'un liquide interagissent si fortement entre eux qu'un calcul a priori des propriétés de ce liquide soit très difficile. (photographie extraite du film de J.F. Allen and J.M.G. Armitage, St Andrews University, 1982).

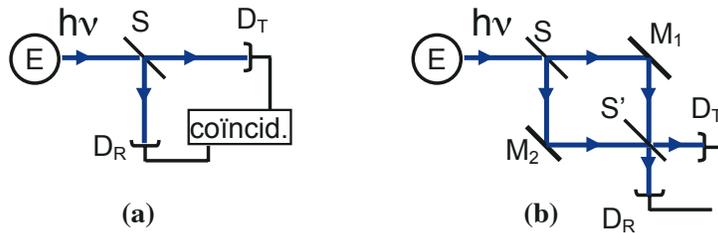


Fig.2. Dualité onde-particule pour un seul photon.

a) Dans l'expérience schématisée à gauche, le photon unique $h\nu$ émis par l'émetteur E est envoyé sur une lame semi-réfléchissante S , qui transmet 50% de la lumière, et en réfléchit 50%. Le circuit de coïncidences, capable de détecter un déclenchement simultané des deux compteurs de photons DR et DT , n'observe aucun événement, ce qui s'interprète en décrivant le photon comme une particule insécable, qui est soit transmise, soit réfléchi, mais ne peut être divisée.

b) Dans le schéma de droite, le faisceau lumineux divisé sur la séparatrice S est recombinaison sur la séparatrice S' , ce qui donne lieu à un phénomène d'interférences : les probabilités de détection en DR et DT dépendent (sinusoïdalement) de la différence des chemins $[SM1S']$ et $[SM2S']$, que l'on peut faire varier en déplaçant les miroirs $M1$ et $M2$. Ces interférences ne peuvent s'interpréter qu'en invoquant une onde qui se sépare en deux sur S et qui est recombinaison sur S' . Or le phénomène a lieu même avec les photons uniques dont on a observé dans l'expérience **a)** qu'ils vont soit d'un côté, soit de l'autre, mais pas des deux côtés à la fois.

Ce comportement différent, suivant l'expérience réalisée, est un exemple de la dualité onde-particule. Il peut également s'observer avec des électrons, des neutrons, ou même des objets plus complexes comme les atomes ou les molécules.

électrique de certains conducteurs à très basse température, et la superfluidité de l'hélium liquide, c'est-à-dire la disparition de sa viscosité (Fig. 1). Ces deux effets remarquables sont une conséquence de la « condensation de Bose-Einstein », phénomène imaginé par Einstein à l'époque des débuts de la mécanique quantique, qui se traduit par la condensation de toutes les particules dans la même onde de matière géante, que l'on a pu observer directement dans des expériences récentes.

La Mécanique Quantique a également bouleversé notre compréhension de la lumière. Dès 1900, Planck avait invoqué la quantification des échanges d'énergie entre lumière et matière afin de rendre compte des propriétés du rayonnement thermique (lumière émise par un corps porté à température élevée, comme le filament d'une lampe à incandescence). En 1905, pour interpréter ce que l'on savait alors de l'effet photoélectrique, Einstein introduisait explicitement la quantification de la lumière elle-même : en la considérant comme formée de grains indivisibles d'énergie, les photons, il déduisait un certain nombre de prédictions précises qui allaient être vérifiées expérimentalement par Millikan. L'importance de ce travail est soulignée par le prix Nobel de 1922 qu'Einstein reçut explicitement pour l'effet photoélectrique, c'est-à-dire pour la quantification du rayonnement lumineux.

Dès les années 1930, la théorie

quantique était suffisamment avancée pour donner une description synthétique de la lumière et de la matière, ainsi que de leur interaction. Elle fournissait en particulier un cadre mathématique non ambigu à l'étonnante dualité onde-particule, que de Broglie avait introduite de façon heuristique, mais qui restait incompréhensible dans un mode de pensée classique (Fig. 2.).

Après la Seconde Guerre mondiale, la théorie quantique permettait d'aller encore plus loin dans le monde de l'infiniment petit, en constituant le cadre approprié pour décrire les particules élémentaires. C'est aussi en s'appuyant sur la description quantique de la matière que les physiciens allaient inventer de nouveaux objets qui n'existaient pas dans la nature, et que les ingénieurs surent bientôt produire en grande série.

Ce furent d'abord le transistor, et ses descendants, les circuits intégrés (Fig. 3.), inventés par un groupe de brillants physiciens du solide à partir d'une réflexion fondamentale sur la nature quantique de la conduction électrique. Inutile d'insister sur l'importance de cette invention, qui a conduit à l'avènement de l'électronique puis à la multiplication des possibilités de calcul, de traitement et de stockage de l'information, comme la machine à vapeur avait, deux siècles plus tôt, multiplié la puissance mécanique utilisable par l'homme, et conduit à la révolution industrielle.

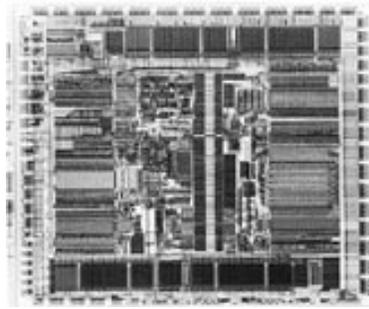
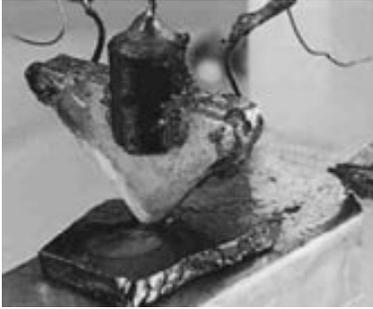


Fig 3. Du transistor au microprocesseur : la physique quantique en action. A gauche : photo du premier transistor, réalisé aux Bell labs, en 1947. On distingue les morceaux de silicium dopés, et le bloc de cuivre faisant contact. La taille du système était de l'ordre du centimètre. A droite : un circuit intégré moderne, qui contient des millions de transistors pour une taille de l'ordre du cm.

Au cœur d'innombrables applications, le laser est le deuxième enfant de la mécanique quantique. On connaît les imprimantes laser, le guidage des engins de travaux publics, les lecteurs de code barre ou de disques compacts, le découpage précis des tôles et des vêtements, la chirurgie laser, etc. On commence à mesurer l'importance des télécommunications par laser et fibres optiques, qui ont multiplié le débit d'information que l'on peut faire circuler à l'échelle de la planète : ce sont des téra bits (millions de millions d'unités d'information) par seconde que l'on sait aujourd'hui transmettre à travers les océans, sur une seule fibre optique équipée d'amplificateurs laser intégrés. Si l'on compare aux quelques bits par seconde des premiers télégraphes Morse, on mesure le chemin parcouru. Les hauts débits des autoroutes de l'information permettent aujourd'hui à l'humanité de partager les informations stockées dans les ordinateurs du monde entier, ou de mettre en commun leurs puissances de calcul (Fig. 4).

La place prise par les applications des lasers ne doit pas faire croire que les progrès dans la compréhension et la maîtrise de l'interaction matière-lumière se seraient arrêtés en 1960. On

a vu par exemple apparaître l'optique quantique dont la plupart des concepts étaient ignorés en 1960, et qui permet de repousser les limites des méthodes d'observation et de mesure optiques, grâce à une meilleure compréhension des limitations ultimes, de nature quantique. On citera aussi la découverte a priori paradoxale, couronnée par le prix Nobel 1997, de Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, et Bill Phillips, qu'une utilisation judicieuse du laser peut permettre non pas de chauffer la matière, mais de la refroidir à des températures proches du zéro absolu. Ces progrès de la recherche fondamentale ont rapidement débouché sur une amélioration spectaculaire de la précision des horloges atomiques, et sur le développement d'interféromètres atomiques prometteurs pour analyser le sous sol ou étudier les irrégularités du mouvement de rotation terrestre. D'ici une à deux décennies, les horloges atomiques logées dans les satellites du système GPS, ou de ses successeurs, seront sans doute à atomes froids, permettant de se situer au centimètre près à la surface de la Terre. Et puis, par ce mouvement de balancier dont ils sont coutumiers, les physiciens projettent aujourd'hui d'utiliser ces horloges améliorées, et

les interféromètres atomiques, pour revenir sur des problèmes de physique fondamentale, comme des tests de relativité générale, ou la recherche d'éventuelles modifications des lois physiques à l'échelle de l'âge de l'Univers. On ne peut qu'être stupéfait qu'il soit aujourd'hui envisageable de détecter en quelques années les infimes variations des lois physiques qui refléteraient les évolutions que laissent imaginer certaines observations astronomiques remontant le cours du temps sur des milliards d'années.

Ainsi, après bientôt un siècle, la première révolution quantique n'en finit pas de produire ses effets. La théorie quantique élaborée dans les années 1905-1925, et raffinée à la fin des années 1940, reste le cadre naturel dans lequel les physiciens continuent de découvrir et de comprendre les propriétés exotiques de la matière dans des situations extrêmes, ou même dans des conditions inconues dans la nature. C'est aussi le cadre dans lequel doivent se placer les ingénieurs qui cherchent à pousser à leurs limites ultimes les technologies dont l'histoire récente nous montre que les progrès vont de pair avec la compréhension de la nature quantique de ces limites. Mais au-delà de cette physique quantique traditionnelle, on assiste aujourd'hui à ce que l'on peut sans doute appeler une « seconde révolution quantique », qui a débuté avec les travaux de John Bell sur le problème d'Einstein-Podolsky-Rosen.

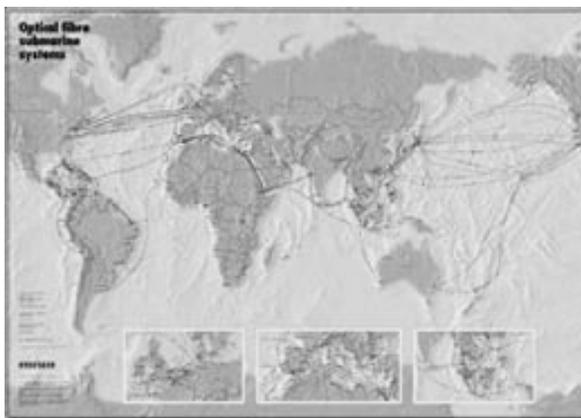


Fig. 4. Télécommunications optiques. Grâce aux amplificateurs lasers à Erbium intégrés dans les fibres optiques elles même, on peut aujourd'hui transmettre à travers les océans un terabit (mille milliards d'informations élémentaires) chaque seconde, sur une seule fibre. Cette carte donne une idée (incomplète) du réseau mondial des fibres optiques pour les télécommunications (document Alcatel).

D'EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN AUX PHOTONS JUMEAUX : L'INTRICATION QUANTIQUE

LE DÉBAT BOHR-EINSTEIN

La mécanique quantique n'a pu se construire qu'au prix de révisions radicales et douloureuses des concepts qui s'étaient imposés en physique classique. Ainsi, pour prendre en compte la dualité onde-particule, elle a dû renoncer à celui de trajectoire. On traduit ce renoncement par les relations de dispersion de Heisenberg (appelées aussi « relations d'incertitude ») qui quantifient l'impossibilité de définir simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision arbitrairement grande. On peut également illustrer ce renoncement en remarquant que, dans une expérience d'interférence, la particule « suit plusieurs chemins à la fois ».

En fait, ces renoncements étaient si radicaux que plusieurs physiciens, dont Einstein et de Broglie, et dans une certaine mesure Schrödinger, n'admettaient pas leur caractère définitif, à la différence de Bohr qui en avait fait la clef de voûte de l'interprétation de la nouvelle théorie connue sous le nom « d'interprétation de Copenhague ». Einstein ne remettait pas en cause le formalisme mathéma-

tique de la mécanique quantique, ni ses prévisions, mais il semblait penser que les renoncements préconisés par Bohr dans son interprétation, ne traduisaient que l'état d'inachèvement de la théorie quantique. Cette position allait donner lieu à des débats homériques entre eux, en particulier celui qui débuta avec la publication, en 1935, de l'article d'Einstein, Podolsky, et Rosen (EPR), dont le titre pose la question : « La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète ? ». Dans cet article, Einstein et ses coauteurs montrent que le formalisme quantique prédit l'existence d'états particuliers de deux particules, par exemple deux électrons, caractérisés par de très fortes corrélations à la fois des vitesses et des positions (Fig. 5.).

Plus précisément, pour un état EPR, le formalisme quantique prédit que des mesures de position sur chacun des deux électrons donneront des valeurs symétriques par rapport à l'origine, et que des mesures de vitesses donneront de même des résultats toujours opposés. Dans un tel état, il suffit donc de mesurer la vitesse d'un électron pour connaître avec certitude celle de l'autre électron. Mais au lieu de mesurer sa vitesse, on pourrait choisir de mesurer la position du premier électron, et on en déduirait la position du second. Les deux élec-

trons étant éloignés l'un de l'autre, le choix de la grandeur mesurée sur le premier ne saurait modifier l'état du second, et Einstein et ses coauteurs en déduisent que le second électron possédait, avant la mesure, des valeurs parfaitement déterminées de vitesse et de position. Et comme le formalisme quantique ne peut pas donner de valeur précise simultanée à ces deux quantités (comme le montrent par exemple les relations d'incertitude de Heisenberg), EPR concluent que le formalisme quantique est incomplet, qu'il ne rend pas compte de la totalité de la réalité physique, et qu'il faut donc s'attacher à essayer de le compléter. Niels Bohr fut, semble-t-il, bouleversé par cet argument qui s'appuie sur le formalisme quantique lui-même pour en montrer le caractère incomplet, provisoire. Ses écrits montrent une conviction profonde que si le raisonnement EPR était correct, compléter le formalisme quantique ne serait pas suffisant, c'est toute la physique quantique qui s'effondrerait. Bohr contesta donc immédiatement le raisonnement EPR, en affirmant que dans un état quantique de ce type, « non factorisable », on ne peut parler des propriétés individuelles de chaque électron, et cela même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre. Avec Schrödinger, qui découvrit au même moment ces états étonnants, on allait désormais parler d'état « intriqué », pour indiquer que les deux électrons sont indissolublement enchevêtrés, qu'ils forment un objet unique quelle que soit leur distance de séparation.

On pourrait penser que ce débat entre deux géants de la physique du XX^{ème} siècle eut un immense écho chez les physiciens. En fait, lorsque l'article EPR parut en 1935, la Mécanique Quantique allait de succès en succès et, mis à part Bohr, la plupart des physiciens ignorèrent ce débat qui leur paraissait académique : il semblait que l'adhésion à l'une ou l'autre des positions fût une affaire de goût personnel (ou de position épistémologique) sans aucune conséquence pratique sur la mise en œuvre du formalisme quantique, ce qu'Einstein lui-même ne semblait pas contester. Il fallut attendre trente ans pour voir paraître un démenti cinglant à cette position relativement consensuelle.

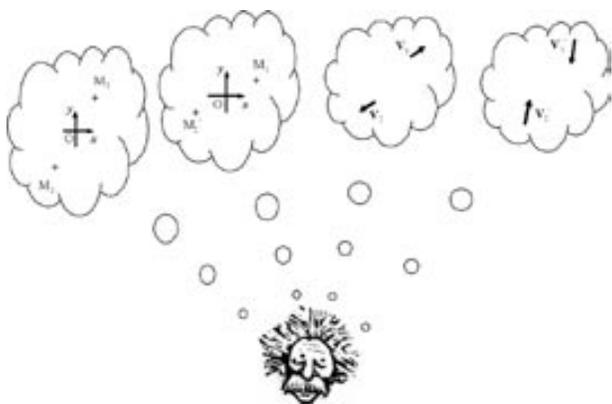


Fig. 5. L'expérience de pensée d'Einstein, Podolsky, et Rosen (1935).

Dans un état quantique EPR, les deux particules 1 et 2 sont totalement corrélées en position et en vitesse. La mesure de position de la première particule peut donner un résultat quelconque (M_1, M_1', \dots) ; mais si on a trouvé M_1 , on trouve avec certitude la deuxième particule en M_2 , symétrique de M_1 par rapport à l'origine, et de même si on a trouvé M_1' pour la première on trouve M_2' symétrique pour la deuxième. De la même façon, les mesures sur les vitesses sont totalement corrélées (on trouve toujours des vitesses opposées : $V_2 = -V_1$, ou $V_2' = -V_1'$). Comme une mesure sur la particule 1 ne saurait affecter instantanément la particule 2 éloignée, EPR concluent que la particule 2 possédait, avant les mesures, une valeur parfaitement déterminée de position et de vitesse, alors que l'état quantique ne spécifie pas ces grandeurs : EPR en concluent que la description quantique de cette situation est incomplète, et qu'il faut compléter le formalisme quantique. John Bell démontrera, trente ans plus tard, qu'il est impossible de compléter le formalisme quantique dans l'esprit des idées EPR.

LE THÉORÈME DE BELL

C'est en 1964 que John Bell, physicien théoricien irlandais travaillant au CERN à Genève, publie un court article qui va bouleverser la situation. En quelques lignes de calcul, il montre que si l'on prend au sérieux l'argument EPR, et donc qu'on introduit explicitement des variables supplémentaires spécifiant la totalité de la réalité physique au sens d'Einstein, par exemple à la fois les positions et les vitesses des électrons intriqués, alors on aboutit à une contradiction avec certaines prédictions quantiques. Plus précisément, même si un tel formalisme à paramètres supplémentaires (on parle aussi de « variables cachées ») permet de rendre compte avec succès de certaines corrélations fortes prévues par le formalisme quantique, ce succès ne s'étend pas à la totalité des observations possibles (on parle d'« observables »). Il n'est donc pas possible de comprendre les corrélations EPR en complétant le formalisme quantique dans l'esprit suggéré par Einstein. Aujourd'hui encore, ce résultat ne laisse pas de nous étonner¹, et il a fallu recourir à l'expérience pour se convaincre qu'il existe bien dans la nature des corrélations aussi fortes que celles prévues par le formalisme quantique.

Pour établir l'incompatibilité entre les prédictions quantiques et les modè-

les à paramètres supplémentaires « à la Einstein », John Bell a montré que les corrélations prévues par ces modèles ont des valeurs limitées par des inégalités – aujourd'hui appelées « inégalités de Bell » – que violent certaines prévisions quantiques. Le choix entre les positions d'Einstein et de Bohr n'est alors plus une question de goût personnel, puisque les deux positions conduisent à des prévisions quantitativement différentes. Il devient possible de trancher le débat par l'expérience, en mesurant les corrélations dans des paires intriquées, et en confrontant les résultats aux inégalités de Bell. En 1964, il n'existait aucun résultat expérimental permettant de conclure. Les expérimentateurs se mirent donc au travail pour construire une expérience « sensible », dans une des rares situations où la Mécanique Quantique prédit une violation des inégalités de Bell. Les expériences les plus convaincantes ont été réalisées avec des paires de photons, sur lesquels des mesures de polarisation – suivant deux directions distinctes – jouent un rôle analogue aux mesures de position et de vitesse dans le schéma EPR original. Après une première génération d'expériences pionnières, une nouvelle série d'expériences conduites au début des années 1980, suivant des schémas de plus en plus proches de « l'expérience de pensée » idéale, donnèrent un ensemble de résultats incontestables,

en excellent accord avec la mécanique quantique, et violant nettement les inégalités de Bell. Une troisième génération d'expériences entreprises à partir du début des années 1990 sont venues conforter ces résultats. Il faut se rendre à l'évidence :

les photons intriqués jumeaux ne sont pas deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un même ensemble de paramètres. Une paire de photons intriqués doit en fait être considérée comme un système unique, inséparable, décrit par un état quantique global, impossible à décomposer en deux états relatifs à chacun des deux photons : les propriétés de la paire ne se résument pas à la réunion des propriétés des deux photons.

L'inséparabilité quantique se manifeste même si les deux photons sont éloignés l'un de l'autre, et qu'aucune interaction n'a le temps de se propager de l'un à l'autre (sauf à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui est exclu par la relativité). Dans les expériences de 1982, les photons étaient séparés d'une dizaine de mètres au moment de la mesure, ce qui suffisait déjà à établir la séparation relativiste (Fig. 6). Dans les expériences récentes, des sources d'un nouveau type permettent d'injecter les photons

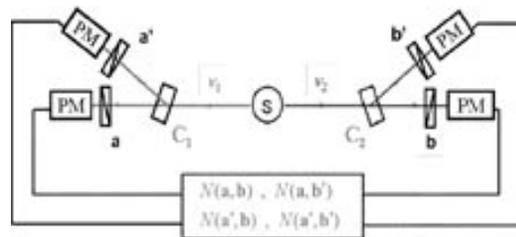


Fig. 6. Expérience d'Orsay (1982). L'utilisation de nouveaux lasers a permis le développement d'une source efficace de paires de photons intriqués, au sein de l'enceinte à vide située au centre de la photo. Des mesures de polarisation ont montré l'existence de corrélations violant les inégalités de Bell, prouvant ainsi la non-séparabilité des photons de chaque paire, même lorsqu'ils sont éloignés l'un de l'autre. Dans cette expérience à l'échelle d'un petit laboratoire, les deux photons étaient éloignés de 12 m au moment des mesures, ce qui suffisait à garantir une séparation relativiste des mesures (les orientations des polariseurs étaient modifiées suffisamment vite pour qu'aucun signal voyageant à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière ne puisse connecter ces mesures). (Crédit Photo : A. Aspect et G. Roger, Institut d'Optique, Orsay).

¹ - S'il s'appliquait au cas des jumeaux humains homozygotes (vrais jumeaux), on devrait renoncer à l'explication génétique des corrélations observées entre leurs caractères physiques (sexe, couleur des yeux...) ou biologiques (groupe sanguin...) : l'identité absolue des génomes ne suffirait pas à expliquer la totalité des ressemblances observées chez les vrais jumeaux !

intriqués dans deux fibres optiques partant dans des directions opposées, et l'inséparabilité a pu être vérifiée à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres (Fig. 7.). Même à de pareilles distances, tout se passe donc comme si les deux photons restaient toujours en contact, et si le résultat de la mesure effectuée sur l'un affectait instantanément l'autre. Cela semble contradictoire avec le principe de causalité relativiste qui spécifie qu'aucune interaction ne peut se propager plus vite que la lumière. En fait, il n'y a pas violation de la causalité au sens opéra-

toire, c'est-à-dire qu'on ne peut utiliser la non-séparabilité quantique pour transmettre plus vite que la lumière un signal ou une information utilisable, et l'intrication quantique ne permet donc pas la « télégraphie supra-luminale » chère aux auteurs de science fiction. Cela ne veut pourtant pas dire qu'elle ne peut avoir d'applications, comme on le verra plus loin. Cela ne veut pas dire non plus que les problèmes conceptuels posés par les propriétés troublantes des états intriqués soient résolus, et les physiciens sont loin d'avoir atteint un consensus sur la façon de compren-

dre l'inséparabilité quantique. Nul ne peut dire aujourd'hui si les progrès viendront de nouvelles expériences, de percées théoriques ou de ruptures épistémologiques.

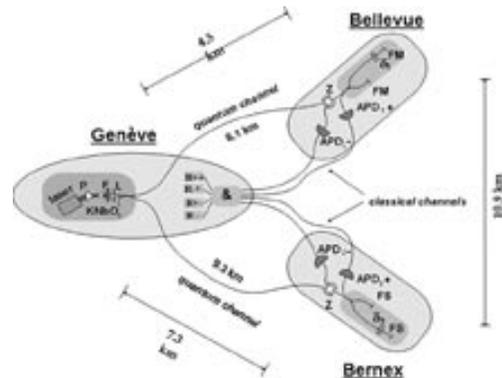


Fig. 7. Expérience de Genève (2000). Cette expérience utilise les fibres optiques du réseau commercial de télécommunication. La source (située à Cornavin) est à plus de dix kilomètres des détecteurs (Bellevue et Bernex). Cette expérience a permis de montrer que l'intrication continue à exister pour deux photons séparés de plus de dix kilomètres. Dans une expérience analogue réalisée à Innsbruck, on met à profit le temps de propagation dans les fibres pour choisir aléatoirement l'orientation des appareils de mesure (polariseurs) pendant les quelques microsecondes qui s'écoulent entre l'émission des photons et leur observation. (Crédit illustration : N. Gisin)

Alain ASPECT (A'1 65),
extrait de DEMAIN, LA PHYSIQUE
Odile Jacob-Sciences

Nous avons présenté dans le numéro 224 de notre Bulletin l'ouvrage collectif *DEMAIN, LA PHYSIQUE* édité par Odile Jacob-Sciences (ISBN 2-7381-1458-X), où dix grands savants français, réunis à l'initiative de l'Académie des sciences, pour l'Année Mondiale de la Physique, nous font partager les extraordinaires avancées de la physique moderne. Parmi eux, dans le Chapitre 5, Alain ASPECT (A'1 65) décrit "Une nouvelle révolution quantique". Nous remercions l'éditeur Odile Jacob et l'auteur Alain ASPECT de nous autoriser à publier ici de larges extraits de ce chapitre, en deux parties, la première dans le précédent bulletin (Bulletin 226) et la seconde dans la présente livraison.

UNE NOUVELLE RÉVOLUTION QUANTIQUE (2)

LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ET LES SYSTÈMES INDIVIDUELS

Jusqu'à la fin des années 1970, les situations expérimentales où la mécanique quantique était impliquée concernaient toujours de très grands ensembles d'objets microscopiques sur lesquels on observait un signal moyen-né. Ainsi, la lumière émise par une lampe à décharge, dont les propriétés spectrales ont conduit à la première révolution quantique, est-elle émise par les millions de milliards d'atomes d'un gaz. De même, la superfluidité de l'hélium liquide, ou la supraconductivité de certains métaux, s'observent-elles sur des quantités macroscopiques, où le nombre d'atomes est de l'ordre du nombre d'Avogadro (6×10^{23} , six cent mille milliards de milliards). Un faisceau laser contient un nombre de photons du même ordre, produits par un milieu amplificateur qui comporte un nombre tout aussi colossal d'ions émetteurs... Dans ce type de situation, il n'y a aucune difficulté à utiliser les résultats probabilistes des calculs quantiques. Puisque les observations portent sur de grands ensembles, les probabilités s'interprètent de manière statistique : si le calcul prévoit qu'un atome dans une lampe spectrale a une probabilité de 80 % d'émettre de la lumière rouge et de 20 % d'émettre du bleu, nous dirons naturellement que 80 % des atomes émettent du rouge, et 20 % du bleu. Mais pourrait-on encore appliquer le formalisme quantique si on avait un seul atome émetteur ? A cette question Bohr répondait oui sans hésitation, alors qu'Einstein en doutait. Ici encore le débat semblait

n'être qu'une question de principe, sans portée pratique, qui ne concernait guère la majorité des physiciens lesquels travaillaient toujours sur de grands ensembles.

L'OBSERVATION DES OBJETS MICROSCOPIQUES INDIVIDUELS

A la fin des années 1970, les physiciens ont inventé des méthodes pour manipuler et observer un seul électron, ou un seul ion, conservé pendant des heures (voire des jours, des mois) à l'aide de champs électriques et magnétiques qui le maintiennent loin de toute paroi, dans une enceinte à vide : on parle alors de particule unique « piégée ». Au cours de la décennie suivante est apparue la microscopie

de champ proche (microscope à effet tunnel, microscope à force atomique), qui a permis d'observer et de manipuler des atomes individuels déposés sur une surface (figure 8). A la même époque, les progrès conceptuels et expérimentaux de l'optique quantique ont conduit au développement de sources où les photons sont émis un par un, comme dans l'expérience de la figure 2 (Dualité onde-corpuscule à un seul photon : voir la première partie de cet article dans le Bulletin 226). Ces avancées expérimentales, couronnées par plusieurs prix Nobel, ont d'abord eu des conséquences importantes en physique fondamentale.

C'est ainsi que le piégeage d'objets élémentaires uniques a fait

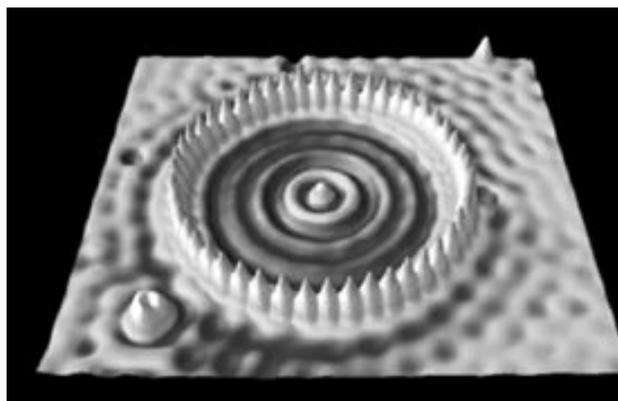


Fig. 8. Corral atomique. Cette image au microscope à effet tunnel montre un « corral atomique » réalisé à l'aide d'atomes de fer déposés sur une surface de cuivre. Les atomes se manifestent par des pics de densité électronique. Les vagues visualisent la fonction d'onde des électrons du cuivre qui sont réfléchis par les atomes de fer (crédit illustration : D. Eigler, IBM).



Fig. 9. Piégeage électromagnétique d'un positron. Une combinaison d'électrodes et de bobines permet de maintenir un seul positron (anti-électron) pendant plusieurs jours dans une enceinte à vide, sans contact avec les bobines qui contrôlent sa position. Ce piège permet également de confiner des antiprotons, ce qui a permis l'obtention d'anti-hydrogène. C'est avec des pièges analogues qu'il a été possible de tester la symétrie matière-antimatière à des niveaux de précision de un milliardième (crédit photographique : G. Gabrielse).

considérablement avancer la connaissance de certaines grandeurs microscopiques, dont la valeur fournit souvent un test sévère de la théorie. Par exemple, les longs temps d'observation accessibles avec un électron unique piégé ont permis de mesurer une quantité fondamentale, le « rapport gyromagnétique de l'électron », avec 13 chiffres significatifs (précision de une partie par dix millions de millions, ce qui équivaut à mesurer la distance de la Terre à la Lune avec une précision de quelques millièmes de millimètre !). Or cette quantité peut être calculée à l'aide de l'électrodynamique quantique, version raffinée de la théorie quantique appliquée aux charges électriques élémentaires : l'accord excellent avec l'expérience est à un niveau de précision tel qu'on ne sait ce qu'il faut admirer le plus, la performance des expérimentateurs, le talent des théoriciens capables de mener à bien des calculs si complexes, ou la puissance prédictive de la théorie.

Le piégeage d'objets élémentaires permet également des tests cruciaux de propriétés aussi fondamentales que la symétrie matière-antimatière : on a ainsi pu vérifier avec une précision confondante l'égalité des charges (au signe près) et des masses d'un proton et d'un antiproton, ou d'un électron et d'un positron (figure 9). Ce type de mesures vise à tester les symétries fondamentales – ou leur brisure – qui sont au cœur de notre compréhension du monde.

LES SAUTS QUANTIQUES

En parallèle avec les progrès expérimentaux, le piégeage d'objets microscopiques individuels obligea les physiciens à se reposer la question, soulevée elle aussi par Einstein, de la signification de la théorie quantique lorsqu'on l'applique à un objet unique. Considérons par exemple la situation de la figure 10 où un atome, soumis à un faisceau laser bien choisi, peut se trouver dans un état « brillant » avec une probabilité Π_B , et dans un état « noir » avec la probabilité complémentaire $\Pi_N = 1 - \Pi_B$. Par « brillant » ou « noir », on veut dire que si on rajoute un faisceau laser auxiliaire – une « sonde » – un atome dans l'état noir ne diffusera aucun photon tandis que dans l'état brillant il en diffusera de nombreux parfaitement observables avec un photodétecteur, ou même à l'œil nu. Lorsqu'on a une vapeur contenant un grand nombre d'atomes dans cette situation, l'interprétation des prédictions probabilistes ne présente pas de difficultés : une fraction Π_B des atomes diffuse des photons, tandis que les autres atomes (dont la fraction est Π_N) ne diffusent pas. Mais que se passerait-il pour un atome unique placé dans la même situation ? Sommés de répondre à ce genre de question, les fondateurs de la mécanique quantique de l'« École de Copenhague » répondaient qu'en présence du premier laser l'atome est en fait dans une « superposition linéaire » de l'état noir et de l'état brillant, état quantique contre-intuitif où l'atome est à la fois brillant et noir. Et lorsqu'on applique le laser sonde, on va trouver l'atome soit dans l'état brillant soit dans l'état noir, avec les probabilités Π_B ou Π_N , sans que l'on puisse savoir d'avance lequel des deux cas sera observé. Mais ils ajoutaient que si l'on répétait l'expérience un grand nombre de fois, alors on observerait la situation brillante pour une fraction

Π_B des expériences et la situation noire pour la fraction Π_N .

En fait, cette description dans laquelle l'atome est dans une superposition de l'état noir et de l'état brillant ne répond pas à la question : que se passe-t-il au cours du temps pour un atome unique que l'on observe en permanence ? Même si la question apparaissait totalement académique dans les années 1930, où l'on était loin de penser qu'on pourrait un jour observer des objets microscopiques uniques, les physiciens de l'école de Copenhague ne l'éluèrent pas : pour y répondre, ils invoquaient le « postulat de réduction du paquet d'onde » qui affirme que lorsqu'un système quantique interagit avec un appareil de mesure, en l'occurrence le laser auxiliaire, ce système quantique cesse d'être dans une superposition d'états et saute dans l'un ou l'autre d'entre eux. On prévoit donc que l'atome basculera alternativement, à des instants aléatoires, de l'état brillant où l'on peut observer les photons diffusés à l'état noir où aucun photon n'est diffusé, et réciproquement.

L'existence de ces « sauts quantiques », qui implique une évolution discontinue du système, avait été violemment contestée par nombre de physiciens parmi les plus grands (tels Einstein ou Schrödinger), qui y voyaient tout au plus un artifice commode, à valeur pédagogique, et semblaient penser que la description quantique ne s'appliquait qu'aux grands ensembles, qu'elle ne pouvait décrire le comportement d'un système individuel. Les progrès expérimentaux ayant permis au milieu des années 1980 l'observation de la fluorescence d'un ion unique piégé (un ion n'est qu'un atome chargé électriquement, mais c'est cette charge qui permet de le piéger facilement), le débat a pu être tranché par l'expérience : on observe effectivement que l'ion évolue aléatoirement entre des périodes où il est invisible et des périodes où il fluoresce intensément (figure 10). Cette observation a beaucoup frappé les physiciens. Au-delà de sa valeur démonstrative, elle a déclenché des progrès inattendus à la fois dans le domaine expérimental et dans le domaine théorique.

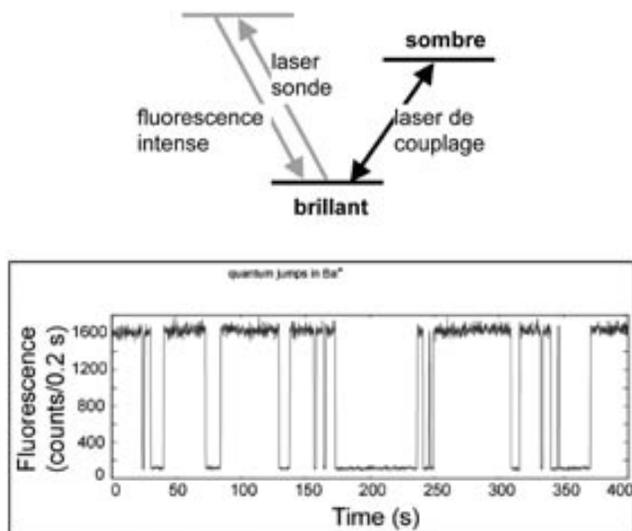


Fig. 10 Sauts quantiques d'un ion unique piégé.

Sous l'effet du laser de couplage, l'ion est dans une superposition linéaire de deux états, brillant et noir. Si on l'éclaire par un laser sonde auxiliaire, l'ion dans l'état brillant diffuse de nombreux photons facilement détectables, alors que dans l'état noir aucun photon du laser annexe n'est diffusé. La figure du bas (enregistrement de la fluorescence en fonction du temps dans une situation de ce type, document C. Raab, J. Eschner, et R. Blatt, communication privée) montre les basculements brutaux d'un état à l'autre à des instants aléatoires, appelés « sauts quantiques ». Si on avait un grand nombre d'ions dans cette situation, on verrait un taux de diffusion de photons quasiment constant, proportionnel à la probabilité de trouver les ions dans l'état brillant. Ce n'est que lorsqu'on a su piéger un ion unique avec des systèmes analogues à celui de la figure 9 que l'on a pu observer les sauts quantiques, dont l'existence était jusque là très controversée.

DES RETOMBÉES PRATIQUES ET THÉORIQUES

Dans le domaine expérimental, on utilise aujourd'hui le phénomène des périodes noires pour mesurer la fréquence de certaines raies spectroscopiques extrêmement fines, inobservables jusqu'alors, et qui sont d'excellents candidats pour de nouvelles horloges atomiques, encore plus précises que celles dont nous disposons. Dans le domaine théorique, la réflexion sur les sauts quantiques a déclenché l'émergence de nouvelles méthodes, appelées « Monte-Carlo quantique », qui donnent une description très proche de ce qu'on observe dans les expériences. Ces méthodes utilisant le calcul sur ordinateur simulent une histoire quantique possible pour le système unique, en tirant au sort les sauts quantiques, les probabilités gouvernant ce tirage ayant été calculées à partir des équations quantiques. Si ces méthodes nouvelles sont bien adaptées à la description des systèmes uniques, elles se sont également parfois révélées – après moyenne – remarquablement plus efficaces que les méthodes théoriques quantiques traditionnelles pour étudier l'évolution d'un grand ensemble de systèmes identiques. De plus, en permettant de se poser des questions sur l'évolution individuelle de chaque système, ces méthodes de Monte-Carlo quantique ont permis de faire le lien entre certains processus quantiques et des statistiques inhabituelles – les statistiques de Lévy – qui jouent un rôle crucial dans des domaines

aussi variés que la biologie, les marchés financiers, ou les embouteillages de la circulation automobile. Comme souvent, ce genre de rapprochement entre sujets sans rapport a priori s'est avéré particulièrement fécond.

DU MICROSCOPIQUE AU MÉSCOSCOPIQUE

Sachant que la mécanique quantique peut décrire le comportement des objets individuels microscopiques, on peut évidemment se demander si elle s'applique à des objets plus gros. On sait bien qu'il n'y a pas besoin d'elle pour décrire le mouvement des planètes ou d'une pomme qui tombe : la physique classique s'en acquitte parfaitement, ce qui explique d'ailleurs sans doute la difficulté de comprendre les concepts quantiques à partir d'une intuition forgée dans le monde macroscopique. Certes, nous avons besoin de la physique quantique pour calculer les propriétés (mécaniques, électriques...) des matériaux dont est fait un objet macroscopique, mais pas pour décrire le comportement de l'objet lui-même.

Il existe toutefois une échelle intermédiaire, l'échelle mésoscopique, où c'est l'objet lui-même – et pas seulement son matériau – qui doit être décrit par la mécanique quantique. On sait ainsi réaliser aujourd'hui des anneaux conducteurs mésoscopiques (à ne pas confondre avec les fils supraconducteurs), dont la taille est de l'ordre du micromètre, et dont la

résistance électrique nulle ne peut être comprise qu'en considérant la fonction d'onde globale de l'ensemble des électrons de ce nanocircuit. Un autre exemple célèbre (prix Nobel 2001) d'objet mésoscopique est celui des condensats de Bose-Einstein gazeux, ensemble d'atomes (typiquement quelques millions) qui eux aussi doivent être décrits par une fonction d'onde quantique globale.

Si ces objets mésoscopiques où une description quantique s'impose sont encore des curiosités des laboratoires de recherche fondamentale, il ne fait guère de doute que les progrès des nanotechnologies, en particulier la miniaturisation ininterrompue des composants semi-conducteurs, obligeront bientôt l'industrie de la microélectronique à utiliser une approche complètement quantique pour maîtriser ces nanocomposants.

DU MÉSCOSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE : LA DÉCOHÉRENCE DES SYSTÈMES QUANTIQUES

Mais alors, si l'on observe un comportement quantique avec des objets de plus en plus gros, où se situe la frontière ? A vrai dire, on ne connaît pas la réponse à cette question, l'une des plus importantes qui soient posées aux physiciens du début du XXI^{ème} siècle.

L'une des propriétés spécifiques de la physique quantique est l'existence

des *superpositions d'états* : si un système possède plusieurs états quantiques possibles, il peut non seulement se trouver dans l'un d'eux, mais il peut également se trouver dans un état hybride formé à partir de ces états de base, une « *superposition cohérente* » de ces états. Les états intriqués sont de telles superpositions cohérentes, mais il existe des exemples beaucoup plus simples et pourtant très étonnants. Nous avons déjà cité le cas d'un atome se trouvant dans la superposition d'un état noir et d'un état brillant. La situation devient encore plus troublante lorsque les deux états correspondent à des situations manifestement incompatibles, par exemple des localisations éloignées. Ainsi, considérons un atome arrivant sur une séparatrice à atomes, analogue à une lame semi-réfléchissante pour les photons (figure 2 : bulletin 226 p. 3). Il peut soit être transmis, soit être réfléchi, ce qui conduit à des trajectoires distinctes. Mais il peut aussi être dans une *superposition des états transmis et réfléchi*, c'est-à-dire *présent à la fois en deux points différents de l'espace*. On peut démontrer expérimentalement que cet état existe vraiment en recombinaison des deux trajets et en observant des interférences, qu'on ne peut interpréter qu'en admettant que l'atome a suivi les deux chemins à la fois (le schéma est analogue à celui utilisé pour les photons, figure 2 : bulletin 226 p. 3).

Un tel comportement a effectivement été observé avec des objets microscopiques (électrons, photons, neutrons, atomes, molécules), ou mésoscopiques (courants électriques dans des nanocircuits), mais jamais avec des objets macroscopiques, alors que rien ne l'interdit *a priori* dans le formalisme quantique. Ce problème a attiré l'attention de nombreux physiciens, à commencer par Schrödinger qui en a donné une illustration amusante sous la forme du fameux chat qui pourrait à la fois être mort et vivant, ces deux états représentant un exemple particulièrement frappant d'états incompatibles. Pourquoi, dans le monde réel, n'observe-t-on pas la superposition cohérente des états « mort » et « vivant » ?

Les physiciens invoquent généralement la *décohérence quantique* pour expliquer l'impossibilité d'une

superposition cohérente d'états d'objets macroscopiques. La décohérence doit se manifester dès qu'un système quantique interagit avec le monde extérieur. Reprenons l'exemple de l'atome dont les trajectoires se sont séparées à l'intérieur d'un interféromètre. Si on l'éclaire avec de la lumière laser, il devient possible d'observer sa trajectoire et de dire s'il suit un trajet ou l'autre. Alors, les interférences disparaissent. On retrouve une situation classique, sans superposition cohérente. Or, plus un objet est complexe et gros, et plus il est, en général, sensible aux perturbations extérieures. On sait par exemple que plus une molécule est compliquée et plus elle a de possibilités d'absorber le rayonnement.

La décohérence par interaction avec le monde extérieur serait donc la clef du passage entre comportements classique et quantique.

Même si ce raisonnement est séduisant, il est loin de clore la question, et de nombreuses questions restent posées. Une des plus troublantes est qu'on ne sait pas identifier une échelle au-delà de laquelle il deviendrait impossible d'éviter la décohérence. Rien n'empêche en principe de prendre suffisamment de précautions pour protéger un système –aussi gros soit-il– de la décohérence. Ainsi, pour reprendre l'exemple de l'interférométrie atomique ou moléculaire, on a pu observer des interférences avec de très grosses molécules, à condition de se garder de les éclairer avec de la lumière qui permettrait de déterminer le chemin suivi. Quant à l'interaction avec le rayonnement thermique qui nous entoure, elle est beaucoup moins dommageable à la cohérence, et on peut toujours la réduire en abaissant la température des parois de l'enceinte dans laquelle se déroule l'expérience. A l'heure actuelle, on n'a aucun argument vraiment convaincant permettant de savoir s'il existe une taille limite fondamentale au-dessus de laquelle les molécules cesseraient d'interférer. Une réponse à cette question aurait des implications immenses, tant sur le plan conceptuel que pour les technologies du futur.

L'INFORMATION QUANTIQUE

DES CONCEPTS AUX APPLICATIONS ?

Alors que les physiciens croyaient avoir digéré la révolution quantique amorcée par Bohr et l'école de Copenhague, la découverte en 1965 des inégalités de Bell et l'observation expérimentale, quelques années plus tard, de leur violation les ont forcés à reconnaître le caractère véritablement révolutionnaire de l'intrication quantique, qui était resté ignoré par la plupart des acteurs de la première révolution quantique. Cette prise de conscience est contemporaine de l'observation des objets microscopiques individuels, et de leurs sauts quantiques. Ces deux concepts, l'intrication quantique et l'évolution quantique des objets individuels étaient certes contenus dans le formalisme quantique, mais leur portée était restée largement sous-estimée. C'est la reconnaissance de leur importance qui est à la base d'une nouvelle révolution quantique.

La portée de cette nouvelle révolution quantique pourrait aller bien au-delà des concepts, et atteindre le traitement et la transmission de l'information. C'est le domaine de l'information quantique, qui vise à mettre en œuvre ces concepts physiques nouveaux – l'intrication et la manipulation d'objets individuels – pour aboutir à des applications étonnantes. Il s'agit d'une part de la cryptographie quantique, qui commence à être opérationnelle, et d'autre part du calcul quantique, qui n'en est qu'à une phase de recherche fondamentale encore très éloignée des applications. On ne sait absolument pas aujourd'hui s'il sera possible un jour de construire un véritable « ordinateur quantique », dont les performances potentielles sont sans commune mesure avec celles des ordinateurs actuels.

LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE

La cryptographie est la science du codage et de la transmission de messages secrets. Elle permet de communiquer des informations sur un canal public sans que des tiers puissent les déchiffrer. Historiquement, on a toujours assisté à une course poursuite

entre des méthodes de codage de plus en plus raffinées et des méthodes de déchiffrement de plus en plus puissantes. Codage et déchiffrement s'appuient d'une part sur des progrès mathématiques, d'autre part sur la puissance croissante des ordinateurs, et on comprend que la sécurité d'un code repose sur l'hypothèse que l'espion qui tente de déchiffrer un message n'a pas un niveau de développement en mathématiques ou en informatique beaucoup plus avancé que l'expéditeur. Seule fait exception la clef de codage à utilisation unique : il s'agit d'une suite aléatoire de caractères, existant en deux exemplaires identiques entre les mains de l'émetteur et du récepteur. On montre, par un théorème à la rigueur toute mathématique, qu'il est alors possible de réaliser un codage inviolable d'un message unique, pourvu que sa longueur soit inférieure ou égale à celle de la clef secrète. Toutes les autres méthodes ne sont sûres que pour un niveau donné de développement mathématique et technologique.

En cryptographie quantique, la sécurité ne dépend plus du niveau de développement : elle repose sur les lois fondamentales de la physique quantique. L'idée de base est qu'il est possible de détecter un espion tentant de prendre connaissance de la clef secrète par la trace qu'il laisse nécessairement, puisqu'en physique quantique il n'existe pas de mesure qui ne perturbe le système mesuré. En l'absence de telle trace, on est sûr qu'il n'y a pas eu d'espion lisant la clef. On peut donc échanger en toute sécurité deux copies d'une clef identique, ce qui permettra ultérieurement, après vérification de l'absence de trace, une transmission publique parfaitement sûre. Comment être sûr en pratique que personne n'a pu lire cette clef pendant sa transmission sur un canal espéré secret ? Il existe plusieurs schémas répondant au problème. L'utilisation de paires de particules EPR offre une solution particulièrement élégante : tant que les mesures ne sont pas faites sur deux particules intriquées éloignées, le résultat de la mesure est imprédictible (sinon il y aurait des paramètres supplémentaires, et les inégalités de Bell ne seraient pas violées). Ce n'est qu'au moment de la mesure que deux résultats identiques apparaissent sur les appareils des deux partenaires : auparavant, la clef n'existait pas, et il n'y avait rien à espionner !

On pourrait évidemment craindre la manoeuvre d'un espion réalisant une mesure intermédiaire et faisant ainsi apparaître la clef, puis renvoyant des photons identiques à ses résultats de mesure, ce qui lui permettrait d'avoir un troisième exemplaire de la clef de codage. On montre en fait que pour démasquer cet espion sophistiqué, il suffit de réaliser, sur un sous-ensemble de mesures, un test des inégalités de Bell : si elles sont violées, il ne peut y avoir d'espion. Des démonstrateurs fonctionnent déjà sur ce principe.

LE CALCUL QUANTIQUE

Au début des années 1990, une découverte théorique a contraint les informaticiens à remettre en cause un dogme de base de leur discipline, en démontrant que si l'on disposait d'ordinateurs quantiques, capables d'utiliser le phénomène d'intrication quantique d'objets individuels, on pourrait mettre en œuvre des algorithmes radicalement nouveaux permettant d'effectuer certaines opérations difficiles, comme la décomposition d'un nombre (grand) en facteurs premiers, dans des temps beaucoup plus courts qu'avec les méthodes habituelles. Par exemple, la décomposition d'un nombre de 400 chiffres demanderait avec les ordinateurs les plus puissants actuels, même mis en réseau à l'échelle mondiale, un temps de calcul supérieur à l'âge de l'univers. Mais avec un ordinateur quantique constitué de quelques centaines de milliers de qubits intriqués, il suffirait de quelques mois ! Cette découverte a une portée conceptuelle considérable, puisqu'elle montre que, contrairement à ce qu'on croyait jusqu'alors, la façon de faire les calculs (l'algorithmique) n'est pas indépendante du type de machine utilisé. Elle pourrait aussi avoir des conséquences pratiques immenses, puisque le cryptage (classique) des informations (par exemple sur la toile) repose aujourd'hui sur l'impossibilité de factoriser les très grands nombres en un temps raisonnable. Des méthodes de factorisation rapides ouvriraient une brèche dans la sécurité des communications, sans doute catastrophique pour les sociétés modernes.

Encore faut-il être capable de construire un ordinateur quantique. Pour attaquer le problème, de nombreux groupes dans le monde se sont lancés dans le développement de sys-

tèmes physiques réalisant une variable quantique élémentaire, le qubit, et de son unité de calcul de base, la « porte logique quantique ». Une porte logique quantique effectue des opérations élémentaires sur les qubits, comme une porte logique habituelle opère sur les bits ordinaires. Mais à la différence de ceux-ci, qui ne peuvent prendre que deux valeurs, 0 ou 1, les bits quantiques peuvent être mis dans une superposition linéaire des deux états 0 et 1, comme un atome peut être dans une superposition linéaire des états « brillant » et « noir ». Une porte logique quantique doit pouvoir combiner plusieurs bits quantiques se trouvant dans de telles superpositions, en donnant pour résultat un état intriqué des qubits. D'intrication en intrication, on obtient des états représentant simultanément un nombre immensément grand de situations, et il est possible d'effectuer des calculs massivement parallèles, même avec un nombre modéré de portes logiques quantiques. Les possibilités sont incomparablement plus vastes que celles de l'algorithmique classique. On comprend qu'il ait fallu attendre le théorème de Bell, qui a permis de prendre conscience du caractère extraordinaire des états intriqués, pour que ces concepts émergent. Et c'est encore le théorème de Bell qui permet de démontrer qu'un ordinateur quantique est irréductible à un ordinateur classique.

L'ordinateur quantique existera-t-il un jour ? Il serait présomptueux de répondre, mais la recherche expérimentale sur les portes logiques quantiques est très active et a déjà obtenu des résultats intéressants. Plusieurs pistes sont en cours d'exploration, avec des bits quantiques reposant sur les systèmes les plus divers : atomes, ions ou photons uniques, mais aussi molécules complexes manipulées par les méthodes de la résonance magnétique nucléaire ; signalons encore les jonctions Josephson, systèmes artificiels réalisés par les techniques de nanofabrication, qui offrent la perspective d'être connectés les uns aux autres dans des architectures de plus en plus complexes. Pour tous ces systèmes il demeure une grande inconnue : saura-t-on maîtriser le problème de la *décohérence*, dont il est à craindre que les effets soient d'autant plus dramatiques

que le système est plus grand ? Ce n'est qu'à cette condition que l'on peut croire en l'avenir de l'ordinateur quantique. Mais même si l'on n'aboutit pas à une réalisation concrète telle qu'on peut en rêver aujourd'hui, nul doute que cet effort de recherche marquera une étape importante dans l'histoire de l'informatique aussi bien que dans celle de la physique quantique.

LA PHYSIQUE QUANTIQUE : UN DÉFI POUR L'INTUITION, UNE SOURCE DE RUPTURES TECHNOLOGIQUES

Près d'un siècle après son émergence, la physique quantique occupe toujours une position singulière. Elle met en jeu des concepts absolument étrangers à une intuition forgée par l'observation des objets et des phénomènes à notre échelle. Même si les physiciens s'y sont habitués, et même si l'on maîtrise le formalisme mathématique permettant d'en rendre compte, l'abandon du concept de trajectoire, et plus généralement d'évolution précise de l'ensemble des observables d'un système, qui étaient si difficiles à accepter pour les contemporains de Niels Bohr, restent très peu intuitifs. A ces difficultés originelles se sont ajoutés d'autres comportements quantiques au moins aussi déroutants : c'est l'évolution des systèmes microscopiques individuels par « sauts quantiques », observables aujourd'hui à l'œil nu ; et c'est surtout l'existence avérée d'états « intriqués » de plusieurs particules, qui se comportent alors comme un tout inséparable même si elles sont éloignées les unes des autres. La question de la frontière entre le monde quantique et le monde classique, plaisamment illustrée par la parabole du chat de Schrödinger, reste un des problèmes conceptuels majeurs sur lesquels butent les physiciens, même si des progrès dans la connaissance des phénomènes de décohérence ouvrent des pistes intéressantes. Ces difficultés conceptuelles se

résoudraient-elles si l'on était capable de réaliser la synthèse de la physique quantique et de la relativité générale ? On peut l'espérer, mais nul ne le sait.

La compréhension profonde du monde quantique est un défi qui ne doit pas rester confiné à la seule communauté des physiciens. Tous ceux qui essaient de penser le monde, à commencer par les philosophes, doivent savoir que ces problèmes conceptuels existent, et en apprécier la difficulté, mais aussi la portée. Les progrès passeront-ils par une reformulation des bases même de la théorie ? Seront-ils déclenchés, comme le plus souvent en physique, par un résultat inattendu qui pourrait apparaître dans les expériences toujours plus raffinées que les physiciens s'ingénient à développer ?

Cette nouvelle révolution quantique débouchera-t-elle sur une révolution technologique ? Les contemporains de Niels Bohr ne savaient pas que quelques décennies plus tard c'est leur formalisme quantique qui permettrait l'invention du transistor, des circuits intégrés, du laser. Peut-être sommes nous aujourd'hui dans une situation analogue vis-à-vis de l'intrication quantique et du comportement quantique des objets uniques. Instruits par l'expérience, nous tentons de trouver des applications à ces phénomènes déroutants. L'information quantique est une voie de recherche audacieuse dont nul ne peut prédire l'issue. Mais on peut parier, sans trop de risques, que des applications que nous ne soupçonnons pas aujourd'hui émergeront tôt ou tard, car comment des phénomènes aussi extraordinaires ne stimuleraient-ils pas l'imagination des chercheurs et des inventeurs ?

Alain ASPECT (A'1 65),
extrait de DEMAIN, LA PHYSIQUE
Odile Jacob-Sciences

POUR EN SAVOIR PLUS

- *La physique quantique*, dossier hors série, Pour la science (juin 1994).
- *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, J. S. Bell, Cambridge University Press (2^{ème} édition, 2004).
- *A la recherche du réel*, B. d'Espagnat, Gauthier-Villars (1979).
- *La mécanique quantique au secours des agents secrets*, A. Eckert, La Recherche (juin 1991).
- *Les promesses de l'information quantique*, N. Gisin, La Recherche (janvier 2000).
- *La physique et les éléments*, Université de tous les savoirs vol. 16 (Coll. Poches), ed. Odile Jacob (2002).
- *Cours et séminaires de la chaire de Physique Atomique et Moléculaire du Collège de France* (C. Cohen-Tannoudji, 1973-2003) disponibles sur : <http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/>
- *Cours et séminaires de la chaire de Physique Quantique du Collège de France* (S. Haroche) disponibles sur : <http://www.lkb.ens.fr/recherche/qedcav/college/college.html>