

quel photon passe par quelle fente. Si nous cherchions à savoir par quelle fente est passé un photon, les photons se répartiraient en tous points de l'écran, et les interférences n'apparaîtraient pas.

Dans leur expérience de pensée, C. Elitzur et L. Vaidman utilisent un interféromètre, c'est-à-dire un appareil composé de deux miroirs et de deux lames séparatrices. La lumière pénétrant dans l'interféromètre arrive sur une des deux lames et se répartit entre deux trajets optiques : un trajet «haut», et un trajet «bas». Les faisceaux se rejoignent sur la seconde lame, qui envoie la lumière sur deux détecteurs de photons (voir la figure 4). Ainsi l'interféromètre offre à chaque photon deux chemins possibles entre la source lumineuse et le détecteur.

Quand on ajuste les longueurs des trajets optiques de sorte qu'elles soient égales, le dispositif est comme un interféromètre de Young. Les détecteurs remplacent l'écran où apparaissent les franges claires et sombres. L'un des détecteurs ne détecte que l'équivalent des franges claires d'une figure d'interférences (nous le nommerons détecteur D-clair) ; l'autre enregistre les franges sombres (nous le nommerons détecteur D-sombre).

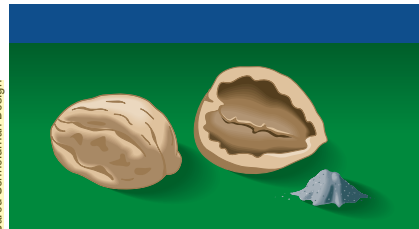
Un caillou dans le passage

Que se passe-t-il quand un caillou bloque l'un des trajets optiques, par exemple le trajet supérieur ? Si l'on considère que la première lame séparatrice répartit les photons au hasard, alors la probabilité qu'un photon suive la trajectoire supérieure est égale à 50 pour cent ; cette probabilité est donc celle que le photon heurte le caillou et ne parvienne jamais à la seconde lame.

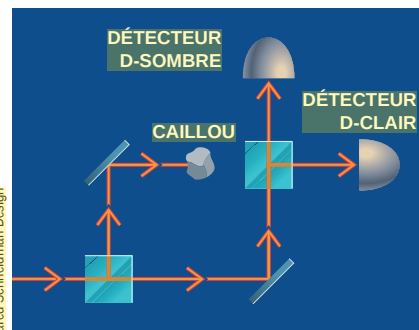
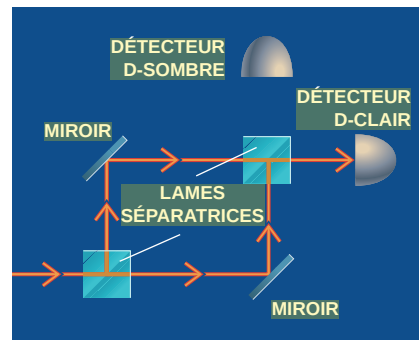
Si le photon suit le trajet inférieur, il ne rencontre pas le caillou. En outre, il n'y a plus d'interférences, car le photon ne parvient à la seconde lame que suivant un seul trajet. Aussi le photon fait un autre choix aléatoire, à la seconde lame : il peut être réfléchi, et frapper le détecteur D-clair, ce qui ne fournit pas d'information, car l'événement aurait pu se produire même si le caillou n'avait pas été là. Cependant le photon peut aussi frapper le détecteur D-sombre : nous saurons alors avec certitude que le caillou se

trouvait sur l'un des chemins de l'interféromètre, car si tel n'était pas le cas, le détecteur D-sombre n'aurait rien capté ; et, dans la mesure où un seul photon a été envoyé et qu'il a atteint le détecteur, il n'a pas pu heurter le caillou. Ainsi nous avons réalisé une mesure sans interaction : nous avons déterminé la présence du caillou sans interagir avec lui.

Bien que cette procédure ne soit efficace que dans certains cas, l'efficacité est absolue dans les cas favorables. La base de cette magie quantique est



3. LE JEU DE BONNETEAU a été réexploré par les physiciens qui ont voulu démontrer la faisabilité de la mesure sans interaction. Imaginons qu'un caillou sensible à la lumière soit caché sous des coquilles de noix. Comment déterminer sa position sans retourner les coquilles, ce qui risquerait de le transformer en poussière ?



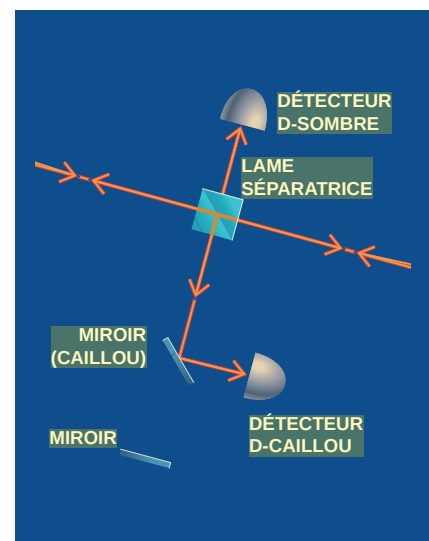
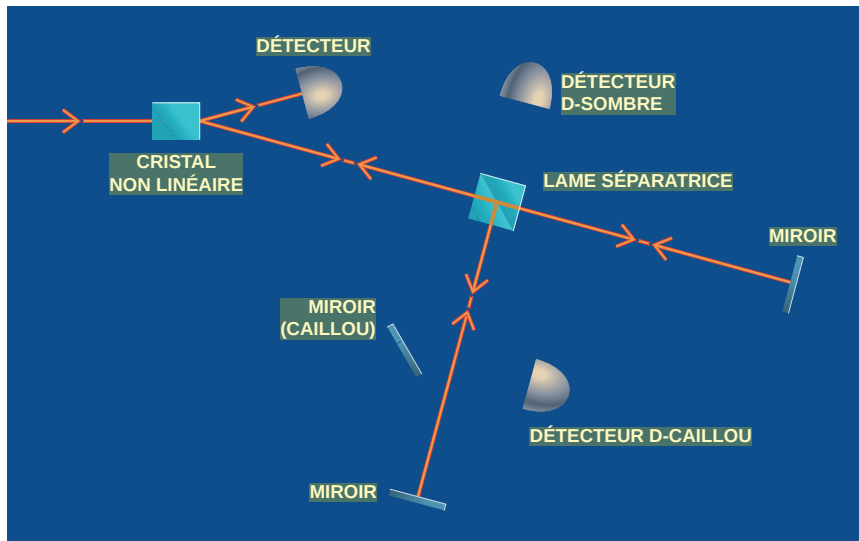
4. DANS L'EXPÉRIENCE de C. Elitzur et L. Vaidman, un photon a le choix entre deux chemins optiques. Les éléments optiques sont disposés de sorte que les photons aillent toujours au détecteur D-clair, et jamais au D-sombre (en haut). Toutefois, la présence d'un caillou sur l'un des trajets envoie parfois un photon sur le détecteur D-sombre (en bas) : une mesure sans interaction a alors eu lieu.

la dualité ondulatoire et corpusculaire des objets microscopiques. Lorsque l'interféromètre est vide, la lumière se comporte comme une onde. Elle peut atteindre les détecteurs en empruntant les deux chemins simultanément, ce qui produit des interférences. Quand un caillou s'interpose, la lumière se comporte comme une particule indivisible, qui ne suit qu'un seul des trajets. La seule présence du caillou élimine la possibilité d'obtenir des interférences, même si le photon n'a pas interagi avec lui.

Pour explorer l'idée de C. Elitzur et L. Vaidman, nous avons réalisé une expérience qui en reprend les principes, démontrant du même coup la faisabilité d'appareils de mesure sans interaction. La source de photons que nous avons utilisée, avec notre collègue Thomas Herzog, de l'Université de Genève, était un cristal non linéaire : lorsque des photons ultraviolets émis par un laser le traversent, ils sont parfois transformés en deux photons d'énergie inférieure, dont les trajectoires s'écartent d'environ 30 degrés. Quand on détecte un de ces photons, on est certain de l'existence de l'autre photon, qui est émis dans le système expérimental où nous effectuons la mesure sans interaction.

Ce dernier est un interféromètre un peu différent de celui qui avait été initialement proposé : les miroirs et les lames séparatrices sont disposés (voir la figure 5), de sorte que la plupart des photons sortent du montage à l'endroit où ils sont entrés (ce qui revient à aller au détecteur D-clair dans l'expérience de pensée, ou à aller sur une frange claire dans l'expérience des fentes d'Young) ; en l'absence du caillou, la probabilité qu'un photon parvienne au détecteur D-sombre est très faible en raison d'interférences destructives (l'équivalent des franges sombres de l'expérience des fentes d'Young).

L'introduction d'un caillou sur le trajet change les probabilités. Dans notre expérience, le caillou est un petit miroir qui dirige la lumière vers un autre détecteur (le détecteur D-caillou). Quand nous avons fait l'expérience, nous avons trouvé que le détecteur D-caillou enregistrait le photon dans la moitié des cas, et le détecteur D-sombre dans un quart des cas ; le reste du temps, le photon quittait l'interféromètre comme il y était entré, sans fournir d'information. L'excitation du



5. L'IDÉE DE C. ELITZUR ET DE L. VAIDMAN a été testée expérimentalement par ce montage fondé sur l'utilisation d'un cristal non linéaire qui produit des paires de photons quand il reçoit un

photon de haute énergie. Le détecteur D-sombre ne capte rien tant qu'un miroir (l'équivalent d'un caillou) n'est pas sur l'un des chemins optiques.

détecteur D-sombre était la trace d'une détection du caillou sans interaction.

Nous avons réduit la réflectivité de la lame séparatrice, afin de diminuer la probabilité que le photon suive le trajet aboutissant au détecteur D-caillou. Nous avons alors observé que, conformément aux prédictions théoriques, les probabilités que les photons parviennent aux détecteurs D-caillou et D-sombre devenaient de plus en plus voisines. Ainsi, en utilisant une lame faiblement réfléchissante, jusqu'à la moitié des mesures peuvent être réalisées sans interaction.

L'effet Zénon quantique

Peut-on faire mieux ? Nous avons activement cherché des modifications expérimentales, mais c'est Mark Kasevich, de l'Université de Stanford, qui nous a mis sur la piste d'une solution, en janvier 1994, quand il est venu passer un mois dans notre laboratoire. Cette solution permettrait la détection sans interaction d'objets, presque à chaque coup. Ce n'est pas la première fois que l'optimisme quantique triomphe du pessimisme classique, et ce ne sera sans doute pas la dernière.

La nouvelle technique est fondée sur un phénomène quantique étrange, qui a été découvert en 1977 par Baidyanath Misra, aujourd'hui à l'Université de Bruxelles, et par George Sudarshan, de l'Université d'Austin : en utilisant l'effet des mesures sur les systèmes quantiques, on peut piéger un système quantique dans son état initial et

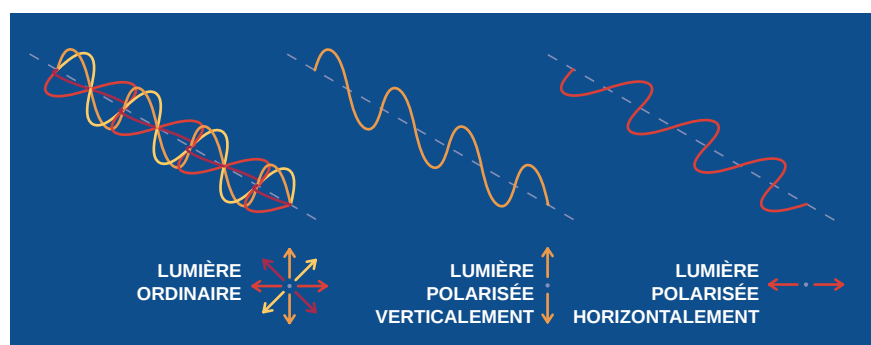
l'empêcher d'évoluer spontanément vers un autre état. Le phénomène est aujourd'hui nommé effet Zénon quantique, parce qu'il ressemble au paradoxe inventé par le philosophe grec Zénon, qui niait qu'une flèche lancée puisse bouger : pour atteindre un point, la flèche doit d'abord gagner le point à mi-distance entre l'arc et la cible, puis le point à mi-distance du chemin restant à parcourir, et ainsi de suite. La flèche devant occuper successivement une infinité de points intermédiaires, le déplacement, concluait Zénon, durerait un temps infini et serait impossible. Certains physiciens nomment ce phénomène l'«effet de la bouilloire observée» : en mécanique classique, l'observation de l'ébullition ne ralentit pas celle-ci, mais, en mécanique quantique, la mesure modifie le résultat.

M. Kasevich a retrouvé des illustrations de cet effet qui avaient été présentées pour la première fois en 1980,

par Asher Peres, de l'Institut de technologie d'Israël. A. Peres s'était intéressé à la polarisation de la lumière, c'est-à-dire la direction d'oscillation de l'onde lumineuse. Cette oscillation est perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière (la lumière du Soleil, comme celle d'autres sources courantes, est composée de rayonnements dont les directions de polarisation sont aléatoires).

Considérons un photon que l'on dirige à travers six «rotateurs» (par exemple, des cuves contenant de l'eau sucrée) qui dévient tous la polarisation d'un angle égal à 15 degrés : si la polarisation initiale est horizontale, la polarisation finale sera verticale (voir la figure 8). À la sortie de l'enfilade de rotateurs, le photon parvient à un filtre polarisant qui ne laisse passer que les photons polarisés horizontalement.

Émettons d'abord un photon polarisé horizontalement, dont la polari-



6. LA DIRECTION DE POLARISATION d'une onde électromagnétique est la direction de la vibration des champs électriques et magnétiques associés à l'onde. Cette vibration est perpendiculaire à la direction de propagation.