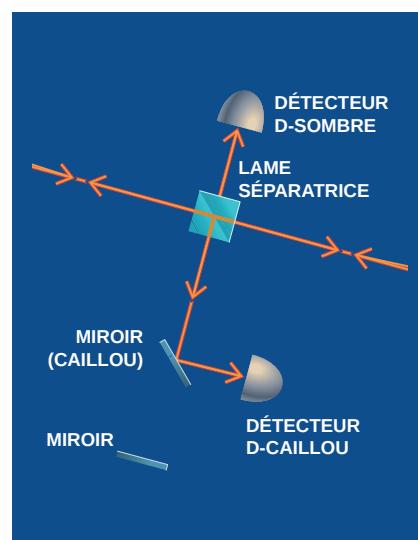
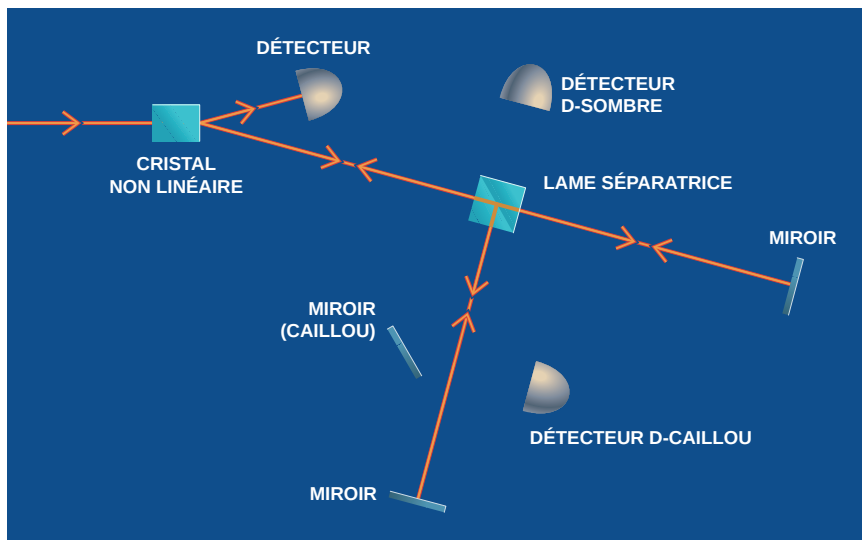




5. L'IDÉE DE C. ELITZUR ET DE L. VAIDMAN a été testée expérimentalement par ce montage fondé sur l'utilisation d'un cristal non linéaire qui produit des paires de photons quand il reçoit un

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

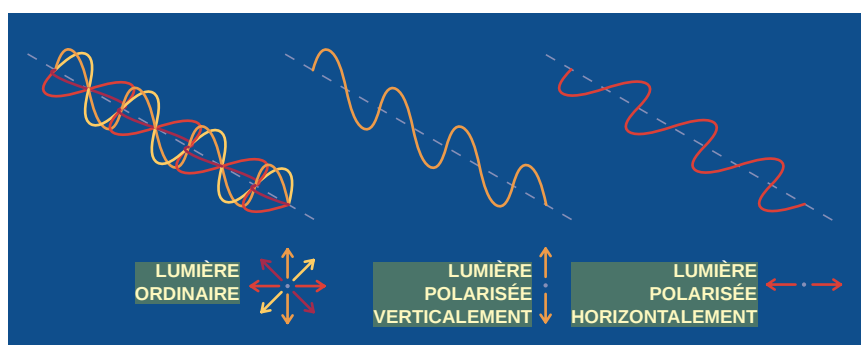
l'empêcher d'évoluer spontanément vers un autre état. Le phénomène est aujourd'hui nommé effet Zénon quantique, parce qu'il ressemble au paradoxe inventé par le philosophe grec Zénon, qui niait qu'une flèche lancée puisse bouger : pour atteindre un point, la flèche doit d'abord gagner le point à mi-distance 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.

sation tourne de 15 degrés à la traversée de chaque rotateur. Le photon n'atteindra jamais le détecteur, car, après avoir traversé toutes les cellules, sa polarisation aura tourné de 90 degrés (15 degrés par rotateur) : elle sera finalement verticale. La rotation progressive de la polarisation est l'évolution quantique que nous souhaitons annuler.

On y parvient en interposant un filtre polarisant horizontal après chaque

rotateur : après le premier rotateur, la polarisation de la lumière est peu modifiée, de sorte que la probabilité que le photon soit absorbé par le premier filtre polarisant horizontal n'est que de 6,7 pour cent (elle est égale au carré du sinus de l'angle de déviation).

Si le photon n'est pas absorbé par le premier filtre, sa polarisation est nécessairement horizontale, car c'est le seul état possible de la lumière sortant d'un filtre polarisant horizontal. Au deuxième rotateur, la polarisation tourne à nouveau de 15 degrés, et le photon a la même probabilité faible d'être absorbé par le filtre horizontal qu'il rencontre alors ; s'il est transmis, c'est encore que sa polarisation est horizontale, et ainsi de suite jusqu'à ce que le photon parvienne au dernier filtre.

La probabilité qu'un photon traverse les six filtres et atteigne le détecteur est égale à $2/3$ (elle est donnée par la relation $\cos^2(15^\circ)^6$). Toutefois,

si l'on augmente le nombre d'étapes, ce qui diminue d'autant la rotation de la polarisation par les rotateurs (cet angle doit être égal au quotient de 90 degrés par le nombre d'étapes), la probabilité que le photon soit transmis augmente. Après 20 étapes, le photon atteint le détecteur presque neuf fois sur dix. Si l'on pouvait réaliser un système à 2500 étapes, la probabilité que le photon soit absorbé par l'un des filtres ne serait que de un sur 1 000. Et après un nombre infini d'étapes, le photon arriverait toujours au détecteur : nous aurions ainsi complètement annulé l'évolution de la rotation.

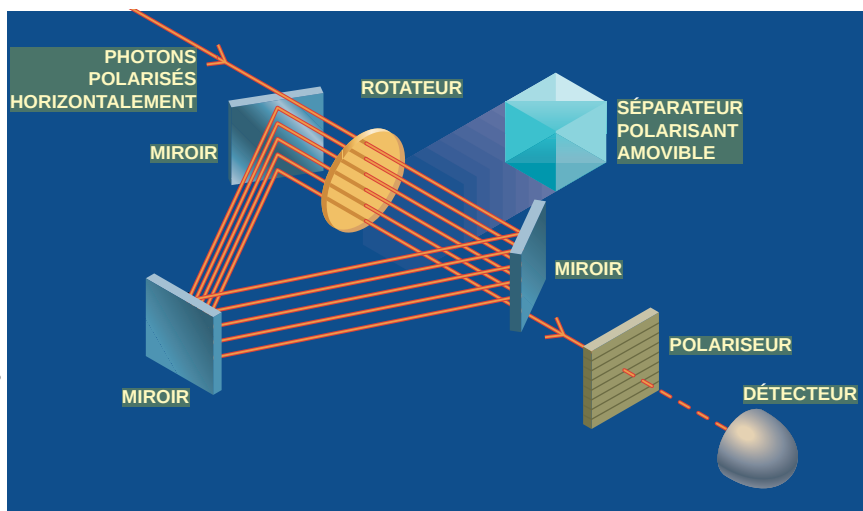
Pour étudier expérimentalement l'effet Zénon quantique, nous avons repris le cristal non linéaire utilisé précédemment et nous avons remplacé six rotateurs et six filtres par un seul rotateur et un seul filtre, où nous avons fait passer le photon six fois de suite, grâce à trois miroirs disposés comme les murs d'un escalier en colimaçon (voir la figure 7). Nous avons observé qu'en l'absence du filtre, le photon qui sort de l'escalier est toujours polarisé verticalement ; en revanche, quand le filtre est présent, le photon est polarisé horizontalement (sauf quand il est retenu par le filtre). Comme l'analyse théorique le prévoyait, ces cas se présentaient environ deux fois sur trois pour un système à six passages.

Nous étions alors prêts à étudier la mesure sans interaction et, plus précisément, à détecter un objet opaque sans lui envoyer de photon. Nous avons conçu un système intermédiaire entre celui qui testait l'effet Zénon quantique et celui avec lequel nous avons vérifié le principe de C. Elitzur et de L. Vaidman (voir la figure 9). Nous envoyons dans le dispositif un photon polarisé horizontalement et nous lui faisons faire quelques cycles (encore six, par exemple) avant de le laisser sortir. À une extrémité du système, on trouve le rotateur, qui fait tourner la polarisation de 15 degrés à chaque cycle. À l'autre extrémité se trouve un interféromètre à polarisation, constitué d'un séparateur polarisant et de deux bras d'égales longueurs terminés par des miroirs.

Au séparateur polarisant, toute la lumière polarisée horizontalement est transmise, et toute celle qui est polarisée verticalement est réfléchi ; le choix de la transmission ou de la réflexion est

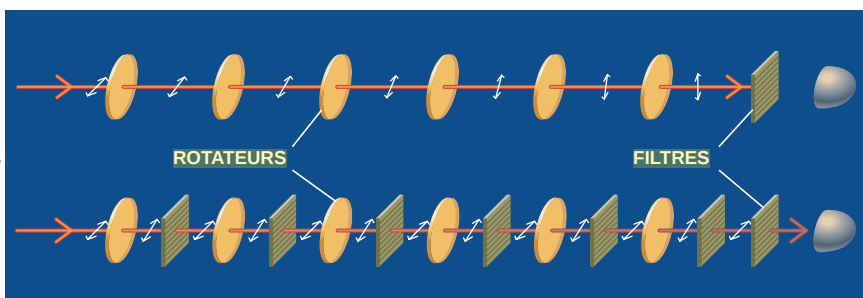


Michael Beck, University of Innsbruck



Jared Schneidman Design

7. UN TEST EXPÉRIMENTAL de l'effet Zénon quantique a été obtenu grâce à ce système, où les photons suivaient une trajectoire en spirale qui leur faisait traverser six fois le rotateur de polarisation. En intercalant un polariseur après le rotateur de polarisation, on annulait la rotation de la polarisation du photon.



Jared Schneidman Design

8. L'EFFET ZÉNON QUANTIQUE a été testé par des successions de dispositifs qui font tourner de 15 degrés la polarisation de la lumière. Après avoir traversé six de ces systèmes, la polarisation d'un photon, initialement horizontale, devient verticale : le photon est absorbé par un polariseur horizontal (en haut). En intercalant un polariseur après chaque rotateur, on bloque la rotation de la polarisation (en bas).