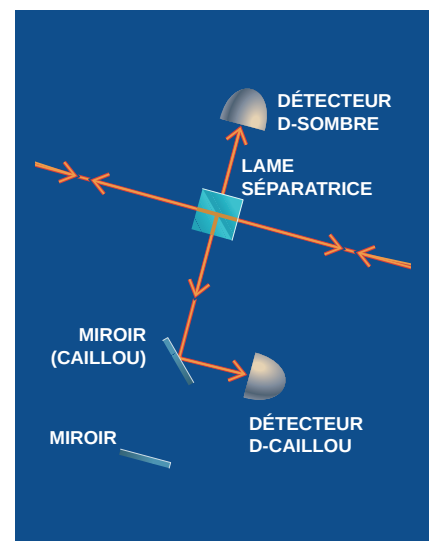
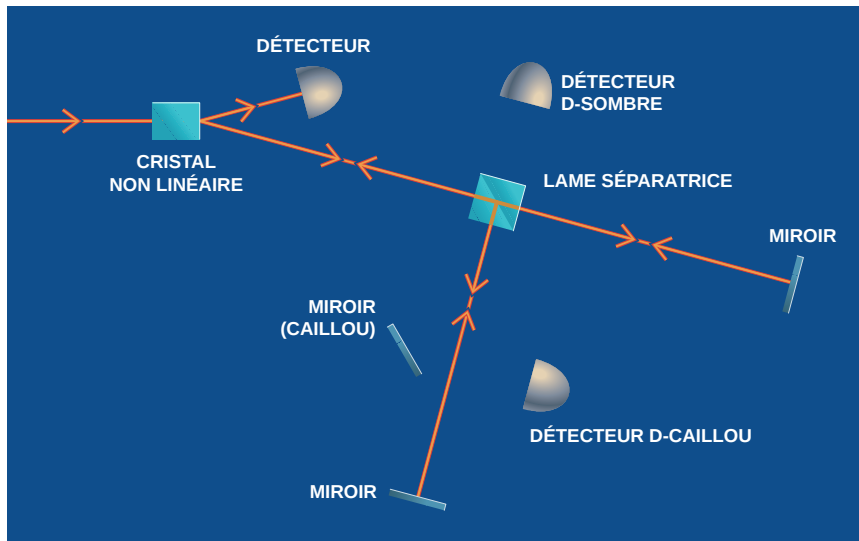




5. L'IDÉE DE C. ELITZUR ET DE L. VAIDMAN a été testée expérimentalement par ce montage fondé sur l'utilisation d'un cristal non linéaire qui produit des paires de photons quand il reçoit un

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

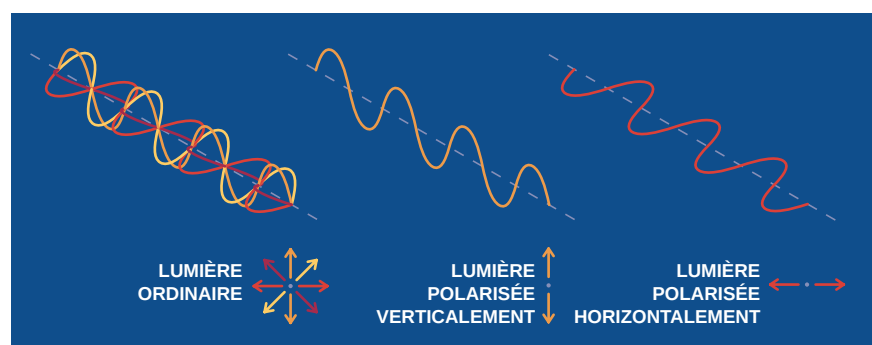
l'empêcher d'évoluer spontanément vers un autre état. Le phénomène est aujourd'hui nommé effet Zénon quantique, parce qu'il ressemble au paradoxe inventé par le philosophe grec Zénon, qui niait qu'une flèche lancée puisse bouger : pour atteindre un point, la flèche doit d'abord gagner le point à mi-distance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

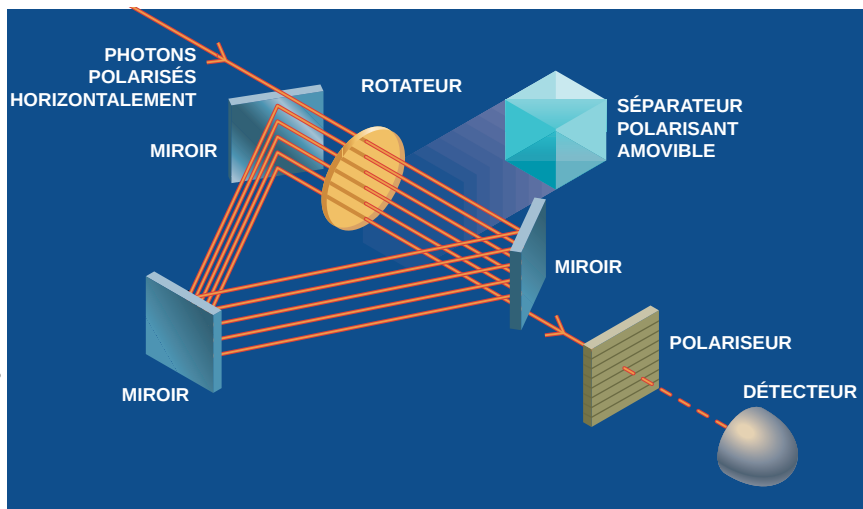
Pour étudier expérimentalement l'effet Zénon quantique, nous avons repris le cristal non linéaire utilisé précédemment et nous avons remplacé six rotateurs et six filtres par un seul rotateur et un seul filtre, où nous avons fait passer le photon six fois de suite, grâce à trois miroirs disposés comme 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

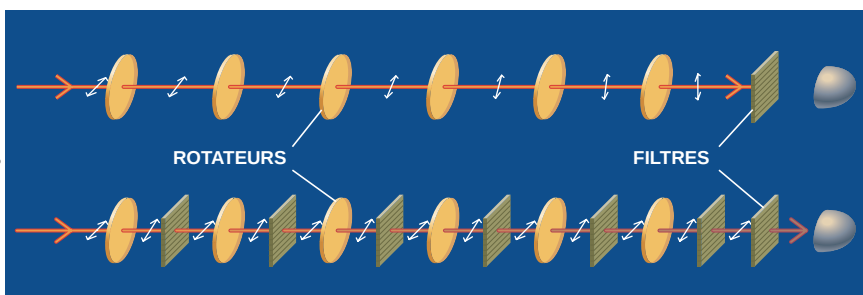


Michael Beck, University of Innsbruck



Jared Schneidman Design

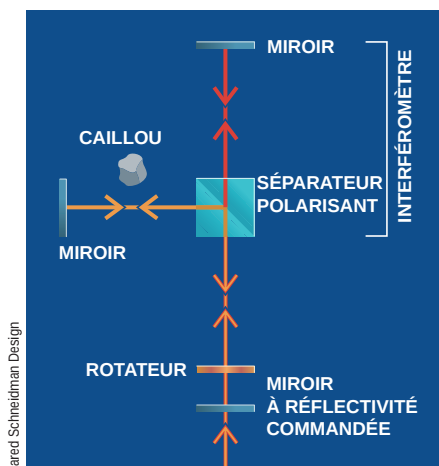
7. UN TEST EXPÉRIMENTAL de l'effet Zénon quantique a été obtenu grâce à ce système, où les photons suivaient une trajectoire en spirale qui leur faisait traverser six fois le rotateur de polarisation. En intercalant un polariseur après le rotateur de polarisation, on annulait la rotation de la polarisation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



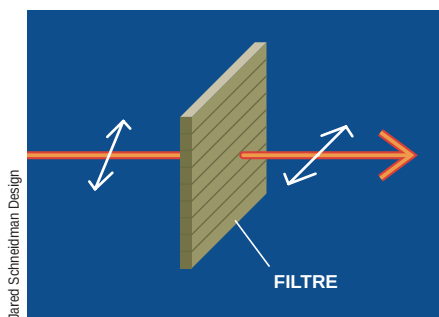
Jared Schneidman Design

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).

l'analogue des deux trajets dans l'expérience des fentes d'Young. En l'absence d'objet dans l'interféromètre à polarisation, la lumière est séparée en fonction de sa polarisation, par le séparateur, puis elle est réfléchiée par les miroirs à chaque passage, avant d'être enfin recombinaée par le séparateur. Ainsi le photon se trouve exactement dans le même état qu'à son entrée dans l'interféromètre (c'est-à-dire, avec une polarisation tournée de 15 degrés vers la verticale). Après six cycles, la polarisation est devenue verticale.



9. UNE MESURE SANS INTERACTION est possible grâce à un système qui combine le dispositif de l'effet Zénon quantique et le système qui avait été utilisé pour tester les idées de C. Elitzur et de L. Vaidman. Le photon pénètre par le miroir à réflectivité commandée et suit six fois le trajet optique qui lui est imposé quand ce miroir est dans un état réfléchissant, avant de sortir du dispositif par ce même miroir. Sa polarisation finale est toujours horizontale quand un objet se trouve sur l'une des branches de l'interféromètre ; elle devient verticale en l'absence d'objet.



10. LE POSTULAT DE PROJECTION stipule que, pour toute mesure effectuée sur un système quantique, seuls certains résultats sont possibles. Après la mesure, le système est dans un état déterminé par le résultat obtenu. Ainsi, un photon sortant d'un filtre polarisant horizontal est nécessairement polarisé horizontalement, même s'il était initialement polarisé presque verticalement (le filtre élimine la composante verticale de la polarisation).

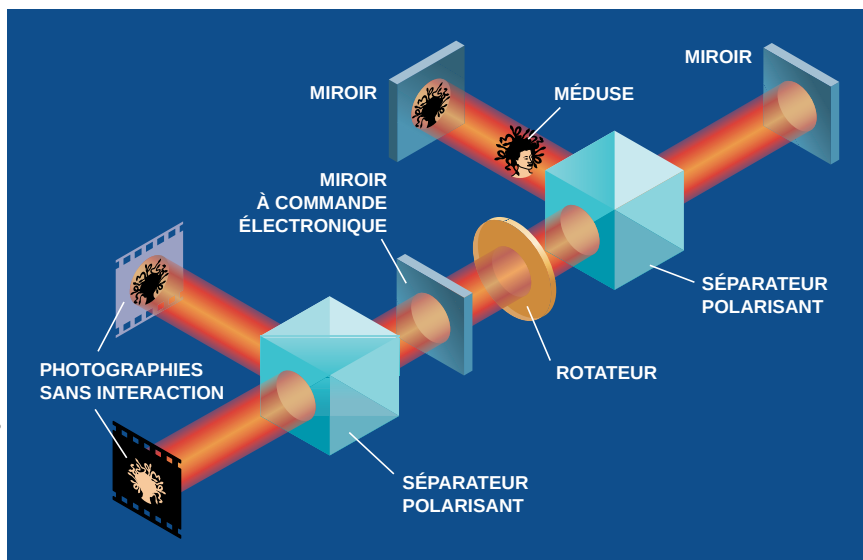
Lorsqu'un objet opaque est placé sur le trajet de la polarisation verticale de l'interféromètre, les six rotateurs sont dans la même configuration que dans le test de l'effet Zénon quantique. Au premier cycle, la probabilité que le photon – dont la polarisation n'a été tournée que de 15 degrés par rapport à l'horizontale – emprunte le chemin de polarisation verticale (et soit absorbé par l'objet) est très faible (6,7 pour cent, comme pour l'expérience de pensée de Zénon). Si cette absorption n'a pas lieu, c'est que le photon est plutôt passé par le chemin de polarisation horizontale : sa polarisation est horizontale.

Comme dans le test de l'effet Zénon quantique, le processus se répète à chaque cycle, jusqu'à ce que, finalement, après six cycles, nous désactivions le miroir inférieur (nous utilisons des miroirs dont la réflexion peut être commandée) et que nous laissions le photon sortir du système. Nous mesurons la polarisation du photon et, si nous la trouvons horizontale, nous concluons qu'un objet est présent l'interféromètre. Sinon, le photon aurait été polarisé verticalement à sa sortie. En augmentant le nombre de cycles, nous pouvons rendre aussi petite que nous le souhaitons la probabilité que le photon soit absorbé par l'objet. Les nouvelles expériences ont démontré qu'au moins 70 pour cent des mesures pouvaient être effectuées sans interaction, et nous espérons faire rapidement monter ce chiffre à 85 pour cent.

Magie quantique appliquée

À quoi servira cette sorcellerie quantique ? Nous avons l'impression d'être comme aux premières années du laser, quand les physiciens savaient que le nouveau dispositif serait la solution de nombreux problèmes encore inconnus. Cette nouvelle méthode de mesure sans interaction pourrait servir, par exemple, de moyen très inhabituel pour prendre des photographies sans éclairer les objets.

Un tel procédé «photographique» fonctionnerait ainsi : au lieu d'envoyer un seul photon, on en enverrait plusieurs, un par pixel, et on effectuerait une mesure sans interaction pour chacun d'eux. Dans les régions où l'objet ne bloquerait pas le chemin optique de l'interféromètre, la polarisation



11. DES PHOTOGRAPHIES pourraient être prises par des systèmes de mesure sans interaction. Ainsi des objets qui ne doivent pas être vus directement, telle la tête de Méduse, pourraient être photographiés à l'aide d'une lumière extrêmement réduite.

horizontale des photons serait progressivement tournée vers la verticale ; dans les régions où l'objet obstruerait le chemin optique, quelques-uns des photons seraient absorbés, tandis que la polarisation des autres serait bloquée dans le plan horizontal. Enfin on enregistrerait une photographie des photons à travers un filtre polarisant, après un nombre suffisant de cycles.

Avec un filtre aligné horizontalement, on obtiendrait une image de l'objet ; avec un filtre aligné verticalement, on obtiendrait son négatif. Dans tous les cas, l'image serait formée à partir de photons qui n'ont jamais touché l'objet. Ces techniques pourraient aussi être appliquées à des objets semi-transparents et pourraient probablement être généralisées à la détection de la couleur d'un objet (cet objectif semble beaucoup plus lointain).

Un procédé d'imagerie fondé sur ce principe serait utile en médecine, par exemple, pour visualiser les cellules vivantes ou pour réduire les doses de rayons X envoyées aux personnes à qui l'on fait une radiographie (un tel procédé de radiographie n'est pas pour demain, car on ne dispose pas des éléments des éléments optiques nécessaires aux longueurs d'onde des rayons X).

L'imagerie des atomes ultrafroids, produits depuis peu dans divers laboratoires, pourrait également profiter de ce type de photographie. En refroidissant suffisamment des atomes, on provoque la condensation de Bose-

Einstein, qui conduit à un nouvel état quantique où les atomes agissent collectivement comme une seule entité. À l'intérieur d'un groupe d'atomes où cette condensation a eu lieu, chaque atome est si froid qu'un seul photon le chasserait du groupe condensé. Initialement, on ne savait donc pas observer la condensation sans détruire le nuage, mais des méthodes de mesure sans interaction permettraient d'observer les assemblages atomiques.

Avec le même type de mesures sans interaction, on pourrait également fabriquer des systèmes quantiques nouveaux. Notamment on pourrait tester expérimentalement l'expérience de pensée du «chat de Schrödinger». Ce chat quantique est préparé de sorte qu'il se trouve simultanément dans deux états quantiques : vivant et mort. Au début de l'année 1996, des physiciens de l'Institut américain de normalisation ont créé une sorte de chaton de Schrödinger, à l'aide d'un ion béryllium : ils ont utilisé une combinaison de champs magnétiques et de lasers pour placer simultanément l'ion en deux endroits, séparés de 83 nanomètres.

Si l'on examinait un tel ion à l'aide d'un appareil de mesure sans interaction, le photon sondeur se placerait également dans des états superposés ; il pourrait finir son trajet en étant polarisé à la fois verticalement et horizontalement. Mieux encore, le type de dispositif expérimental présenté précédemment

devrait pouvoir placer un groupe de plusieurs photons dans la même superposition. Chaque photon «saurait» qu'il est dans le même état de polarisation que tous les autres, mais aucun ne connaîtrait sa propre polarisation ; les photons resteraient dans cette situation de superposition jusqu'à ce qu'une mesure révèle la nature verticale ou horizontale de leur polarisation. La taille notable du paquet de photons ainsi préparé montrerait que des effets quantiques peuvent se faire sentir au niveau macroscopique.

Inaccessible à notre expérience quotidienne, le concept de mesure sans interaction est exorbitant. Il semblerait peut-être moins bizarre si l'on se souvenait que la mécanique quantique décrit un monde de potentialités. C'est parce qu'il *pourrait* y avoir une interaction que l'on s'efforce de l'annuler.

Ceux que cette remarque n'aide pas à admettre le phénomène peuvent se reconforter en pensant que les physiciens eux-mêmes ont très difficilement accepté l'étrangeté du monde quantique. La clé de la magie quantique – la complémentarité, la double nature corpusculaire et ondulatoire de la lumière, ainsi que la nature de la mesure quantique – est connue depuis 1930, mais les physiciens n'ont cherché que tout récemment des applications de ces principes. Et c'est ainsi qu'ils ont imaginé de voir dans l'obscurité.

Paul KWIAT, Harald WEINFURTER et Anton ZEILINGER ont effectué une bonne partie de leur travail commun à l'Université d'Innsbruck.

Richard P. FEYNMAN, *QED : The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, 1985.

Avshalom C. ELITZUR et Lev VAIDMAN, *Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements*, in *Foundations of Physics*, vol. 23, n° 7, pp. 987-997, juillet 1993.

P.G. KWIAT, H. WEINFURTER, T. HERZOG, A. ZEILINGER et M.A. KASEVICH, *Interaction-Free Measurement*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 24, pp. 4763-4766, 12 juin 1995.

Les mesures sans interactions sont discutées sur le réseau Internet, à l'adresse <http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/#Inter> et à <http://p23.lanl.gov/Quantum/kwiat/ifm-folder/ifmtext.htm>
