

Voir sans regarder

PAUL KWIAT • HARALD WEINFURTER • ANTON ZEILINGER

L'optique quantique détecte des objets sans interagir avec eux, même par de la lumière.

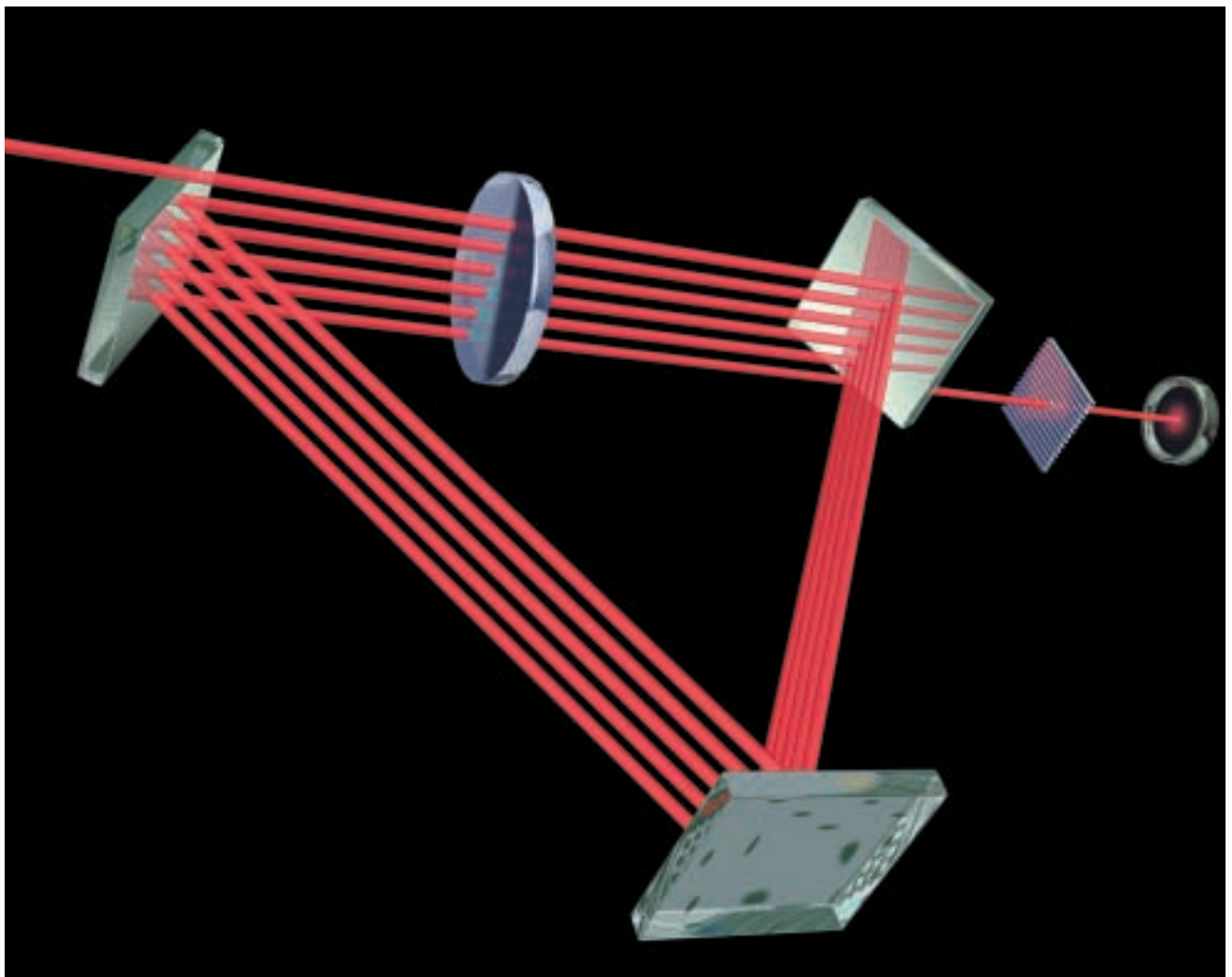
Les mythes grecs rapportent comment Persée affronta Méduse, créature aux cheveux de serpents qu'aucun mortel ne pouvait contempler en face sans être instantanément pétrifié. Certaines versions du mythe racontent que Persée échappa à la pétrification grâce à un bouclier que lui avait donné Hermès : il prit soin

de ne regarder la Gorgone qu'indirectement, avant de lui couper la tête.

En 1962, Dennis Gabor, l'inventeur de l'holographie, affirma que Persée n'aurait pas échappé à Méduse si les lois de la physique avaient été respectées : aucun objet, énonça-t-il, ne pouvait être observé avec moins d'un photon, ou grain de lumière.

Toutefois, ces dernières années, les spécialistes de l'optique quantique ont appris que cette affirmation n'était ni évidente ni, même, exacte : ils savent maintenant déterminer la présence d'un objet même quand aucun photon ne l'a percuté.

Une telle mesure sans interaction est paradoxale : sans interaction, com-



Michael Goodman

1. L'EFFET ZÉNON QUANTIQUE, version du paradoxe de l'impossibilité du mouvement forgé par le philosophe grec Zénon, est utilisé dans des dispositifs qui font des mesures sans interagir avec les

systèmes sur lesquels porte la mesure. Pour observer cet effet, on utilise un faisceau laser qui suit un trajet en escalier menant à un détecteur de photons.

ment obtenir une mesure? Cette question est légitime en mécanique classique, quand on décrit le mouvement des ballons de football, des planètes ou, plus généralement, des objets assez gros ; mais il en va autrement en mécanique quantique : au royaume des électrons, des photons et des autres particules subatomiques, des mesures sans interaction sont possibles quand on utilise des effets inédits et des systèmes expérimentaux bien conçus. Armé de physique quantique, Persée aurait pu trouver un moyen de «voir» Méduse sans aucune lumière provenant de la Gorgone ; il aurait pu voir sans regarder.

Des détecteurs quantiques qui mesureraient ainsi sans interaction auraient de nombreuses utilisations dans la vie quotidienne, mais ce sont surtout les conséquences philosophiques de leur fonctionnement qui sont intéressantes. Elles s'évaluent mieux grâce à des expériences de pensée, c'est-à-dire des analyses qui envisagent les résultats d'expériences qu'on ne cherche pas à réaliser en pratique.

Imaginons une variation du jeu de bonneteau, avec deux coquilles de noix et un cailloux caché sous l'une d'elles. Le caillou est spécial : il est réduit en poussière par la lumière. Le jeu consiste à chercher l'emplacement du caillou sans soulever les coquilles, et en lui évitant toute perturbation ; si le caillou est réduit en poussière, le joueur perd la partie.

Il semble impossible de gagner à tout coup, mais on gagne un coup sur deux si l'on soulève la coquille supposée ne pas contenir le caillou : si rien n'apparaît, alors le caillou se trouve sous l'autre coquille ; si un peu de poussière est présente, c'est que le caillou s'y trouvait.

Poursuivons notre modification du jeu en le simplifiant, de sorte qu'un joueur limité aux lois de la physique classique ne puisse plus gagner : nous ne conservons qu'une seule coquille, et une chance sur deux que le caillou soit dessous. Le but du jeu est de dire si le caillou est présent, toujours sans l'exposer à la lumière.

Supposons qu'il y a un caillou sous la coquille. Si le joueur ne regarde pas sous la coquille, il n'obtient pas d'information. S'il regarde, alors il sait que le caillou était là, mais, comme il l'a exposé à la lumière, il ne retrouve qu'un tas de poussière. Pourrait-on diminuer l'éclairement, de sorte que la lumière

qui atteint le caillou soit minimale? Pour voir quelque chose, il faut au minimum un photon.

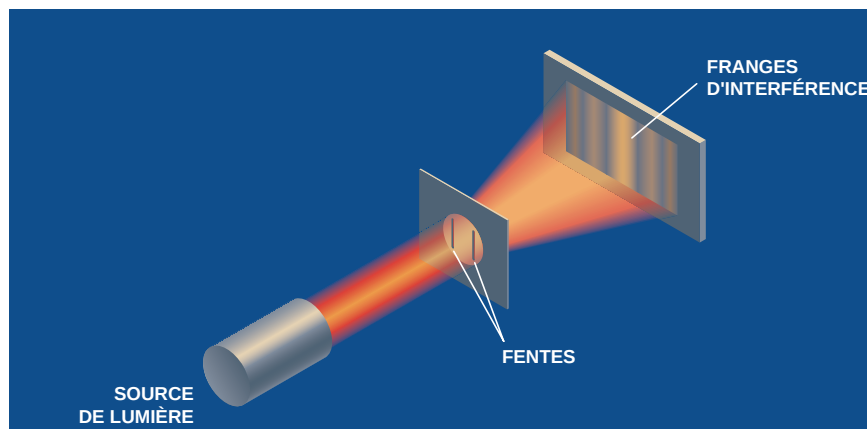
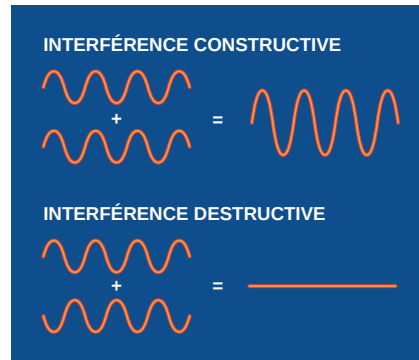
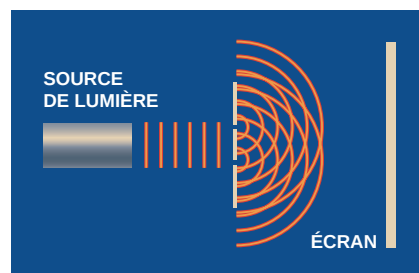
Elitzur, Vaidman et la bombe

Avec un caillou, le jeu n'a pas de conséquences dramatiques, mais, à l'Université de Tel Aviv, C. Elitzur et Lev Vaidman ont proposé un problème équivalent, où le caillou serait remplacé par une bombe qui exploserait en recevant le moindre photon, quelle que soit son énergie. Comment déterminer alors si la bombe se trouve sous une coquille?

C. Elitzur et L. Vaidman ont trouvé une solution qui ne donne un bon résultat qu'une fois sur deux, mais qui a montré qu'il existe un espoir de gagner un jour. Nous avons mentionné que la lumière est constituée de photons, mais, dans certaines circonstances, elle présente des propriétés purement ondulatoires et, notamment, peut former des interférences. Ces dernières se forment quand deux ondes se rencontrent dans une même partie de l'espace. Par exemple, dans l'expérience des fentes d'Young, la lumière traverse simultanément deux fentes parallèles, avant d'atteindre un écran situé derrière les fentes. Sur l'écran, les interférences se présentent sous la forme de raies alternativement sombres et claires (voir la figure 2). Les raies claires correspondent à des zones où les creux et les crêtes de la lumière provenant d'une fente se superposent respectivement aux crêtes et aux creux de la lumière provenant de l'autre fente. Les raies sombres correspondent à

des interférences destructives, où les crêtes de l'une des ondes se superposent aux creux de l'autre, et *vice versa*. Autrement dit, les raies claires correspondent à des zones de l'écran que les photons ont de fortes probabilités de frapper, et les bandes sombres de faibles probabilités.

La mécanique quantique montre que des interférences apparaissent lorsqu'un événement peut se produire de plus d'une façon, si ces façons sont indiscernables (cette définition de l'interférence est plus générale que celles qui sont généralement données dans les manuels). Dans l'expérience d'Young, la lumière a deux façons d'atteindre l'écran (elle peut passer par la fente supérieure ou par la fente inférieure), et on ne cherche pas à savoir



2. DES INTERFÉRENCES apparaissent lorsqu'un rayon laser traverse un écran percé de deux fentes : derrière l'écran, des ondes concentriques interfèrent (en haut). Ces ondes peuvent s'ajouter de façon constructive ou destructive (au milieu), engendrant une figure d'interférence composée d'une alternance de bandes sombres et claires (en bas).

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).

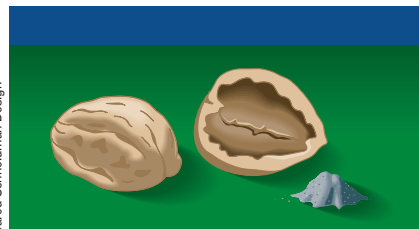
Un caillou dans le passage

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.

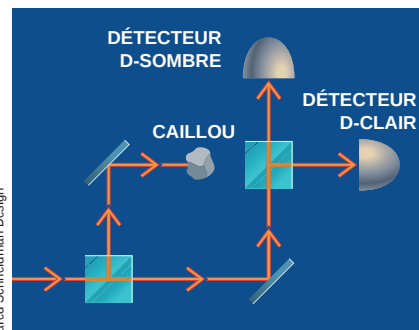
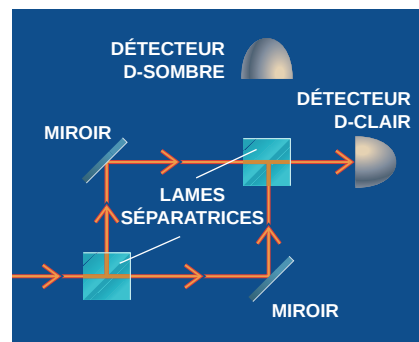
Si le photon suit le trajet inférieur, il ne rencontre pas le caillou. En outre, il n'y a plus d'interférences, car le photon ne parvient à la seconde lame que suivant un seul trajet. Aussi le photon fait un autre choix aléatoire, à la seconde lame : il peut être réfléchi, et frapper le détecteur D-clair, 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 ?



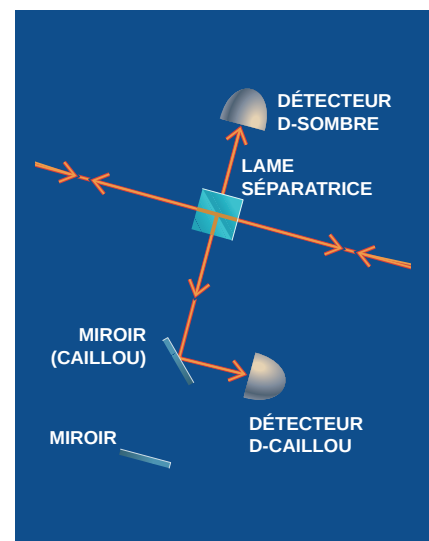
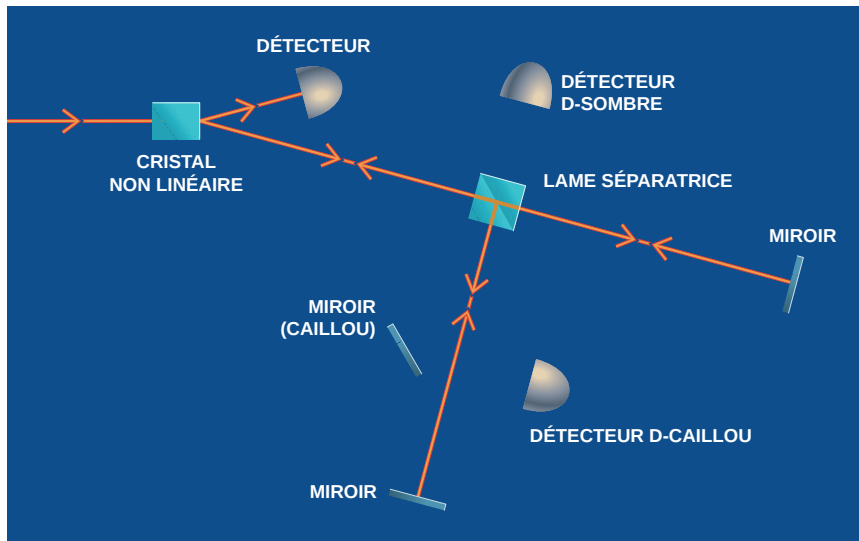
4. DANS L'EXPÉRIENCE de C. Elitzur et L. Vaidman, un photon a le choix entre deux chemins optiques. Les éléments optiques sont disposés de sorte que les photons aillent toujours au détecteur D-clair, et jamais au D-sombre (en haut). Toutefois, la présence d'un caillou sur l'un des trajets envoie parfois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

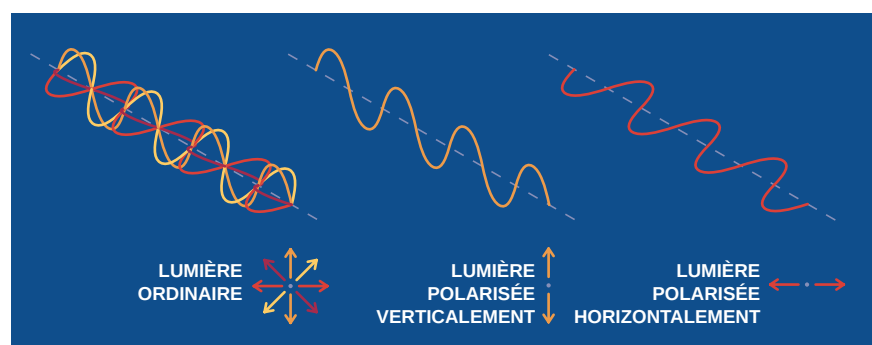
l'empêcher d'évoluer spontanément vers un autre état. Le phénomène est aujourd'hui nommé effet Zénon quantique, parce qu'il ressemble au paradoxe inventé par le philosophe grec Zénon, qui niait qu'une flèche lancée puisse bouger : pour atteindre un point, la flèche doit d'abord gagner le point à mi-distance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

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.

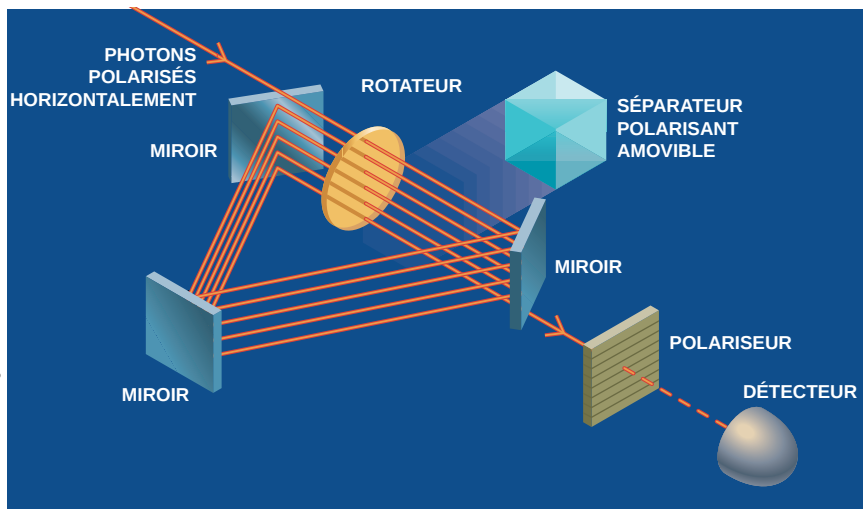
Pour étudier expérimentalement l'effet Zénon quantique, nous avons repris le cristal non linéaire utilisé précédemment et nous avons remplacé six rotateurs et six filtres par un seul rotateur et un seul filtre, où nous avons fait passer le photon six fois de suite, grâce à trois miroirs disposés comme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

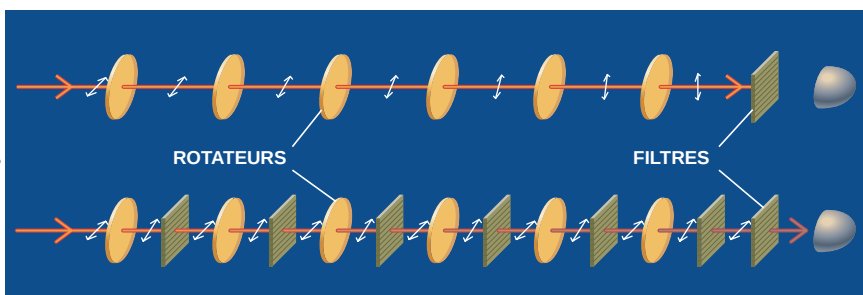


Michael Beck, University of Innsbruck



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).