

DÉCODAGE > **À LA UNE** Le temps n'existe pas!

# 1 L'expérience qui a tué le temps

Des physiciens de l'université de Genève viennent d'apporter la preuve que le temps n'existe pas dans le monde microscopique! Dès à présent historique, leur expérience sur le comportement de particules de lumière mystérieusement corrélées fait voler en éclats la causalité spatio-temporelle.

Quelque chose d'hors du commun s'est passé dans le sous-sol de l'université de Genève. Littéralement. Car pour la première fois, notre sens commun de la causalité spatio-temporelle a été pris en défaut, sans échappatoire possible! Il a suffi pour cela d'une expérience, d'ores et déjà historique. En résumé, des couples de petites particules de lumière (photons) ont été envoyés, via des fibres optiques, contre deux miroirs éloignés de 55 m. Ces miroirs étant semi-transparents, chaque photon pouvait soit s'y réfléchir, soit passer à travers. Or, le comportement de ces paires de photons face aux miroirs s'est révélé parfaitement semblable: soit ils s'y réfléchissaient tous les deux, soit ils les traversaient de concert. Le problème, c'est que rien ne peut expliquer comment les choses ont pu se passer dans le temps pour que les photons appariés aient un tel comportement...

Imaginons que l'on observe deux personnes se comportant exactement de la même façon. On se dit qu'il y a forcément un truc: ou bien elles se sont mises d'accord au préalable, ou bien l'une a informé l'autre de ses propres actions afin qu'elle l'imites. Il n'existe pas d'autre façon raisonnable d'expliquer l'observation de deux phénomènes identiques: soit il s'agit d'une corrélation "programmée", avec une cause commune dans le passé déterminant leurs comportements, soit on a affaire à une corrélation "téléphonée", le comportement de l'un influençant celui de l'autre via un signal. Eh bien, aucun de ces deux arguments ne peut expliquer les résultats observés et publiés par Nicolas Gisin, Hugo Zbinden, Valerio Scarani et André Stefanov du groupe de

## > LE CONTEXTE

Les physiciens ont un problème avec le temps: alors que la physique classique de Galilée, Newton ou Einstein se fonde sur cette notion pour expliquer la façon dont les choses se déroulent dans la Nature, la physique quantique, élaborée au début du XX<sup>e</sup> siècle pour décrire le monde de l'infiniment petit, elle, ne la respecte pas *a priori*. Les physiciens ont longtemps eu l'espoir de pouvoir recoller les morceaux, mais l'expérience qui vient d'être réalisée à l'université de Genève met à bas cette ambition. On sait aujourd'hui que le temps ne peut plus être utilisé pour repérer la façon dont les choses se passent dans le monde microscopique.

physique appliquée de l'université de Genève et par Antoine Suarez, du Centre de philosophie quantique de Zurich. Dans leur expérience, la corrélation des photons face aux miroirs ne peut être ni programmée, ni téléphonée. Alors quoi? En fait, la seule explication est que la corrélation s'est produite... sans que le temps ne s'écoule!

## PRÉVU PAR LA THÉORIE

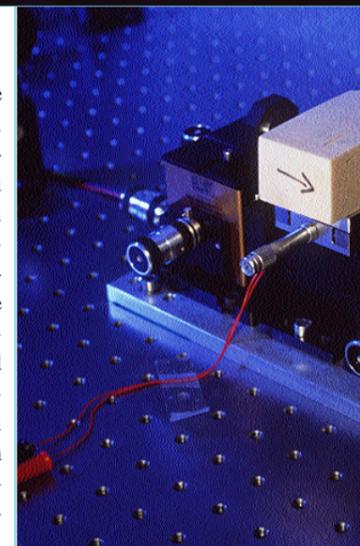
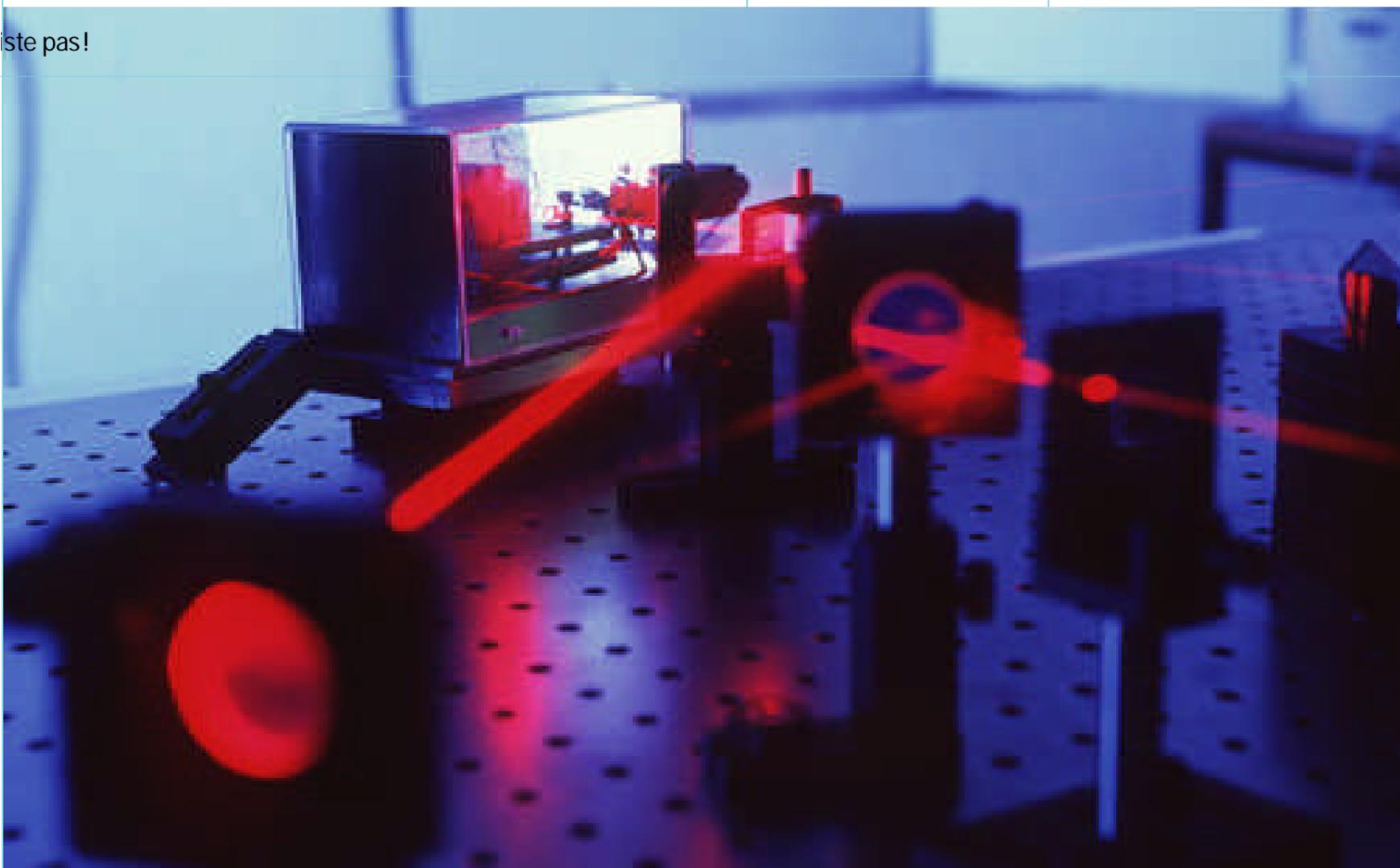
N'espérez pas observer un tel prodige dans notre monde: il ne peut se dérouler que dans les échelles de l'infiniment petit. Il est d'ailleurs très précisément décrit par la mécanique quantique, la théorie la plus efficace pour

Lasers, lentilles, miroirs, fibres optiques... c'est avec de tels instruments que l'expérience a démontré que le comportement de photons appariés n'est pas lié au temps.

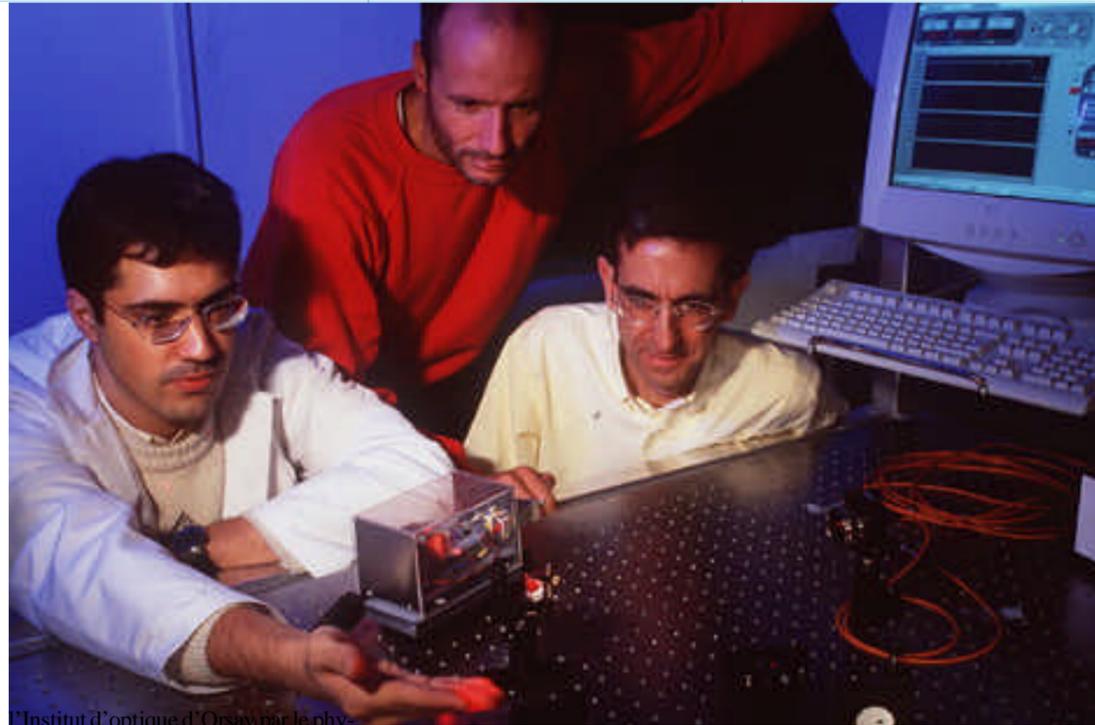
dépendre le comportement de la Nature microscopique en général, et des photons en particulier. En effet, la théorie quantique pronostique l'existence d'un phénomène d'"intrication" liant le destin de deux particules (voir encadré), sans en donner d'explication. C'est aux physiciens de se débrouiller pour l'interpréter. Et l'expérience qui vient d'être menée à Genève les met aujourd'hui au pied du mur.

Pour commencer, on sait que les corrélations ne peuvent être programmées. Dans un fameux article publié en 1935, Albert Einstein, qui pressentait tout le danger de cette intrication pour la cau-

salité, pensait qu'il existait une cause commune, une "variable cachée", qui expliquerait pourquoi deux particules intriquées ont leurs comportements ainsi corrélés. Mais en 1964, John Bell, un physicien irlandais basé à Genève, élaborait une inégalité qui permet de distinguer l'existence ou non de cause commune dans ce phénomène: si, en répétant l'expérience un très grand nombre de fois, les statistiques respectent cette inégalité, alors l'intrication peut s'expliquer comme une corrélation programmée; sinon, une telle explication n'est pas tenable. Historique, l'expérience a été réalisée en 1982 à →



DÉCODAGE > **À LA UNE** Le temps n'existe pas!



Institut d'optique d'Orsay par le phy

^ Sous le regard attentif d'Hugo Zbinden et d'Antoine Suarez (de gauche à droite), le jeune thésard Andre Stefanov met au point les derniers réglages de l'expérience.

> **RETOUR SUR IMAGE**

En 1982, le physicien français Alain Aspect mettait en évidence expérimentalement le phénomène d'intrication, démontrant que le monde quantique ne respecte pas la notion classique d'espace. Cette expérience historique faisait entrer l'intrication dans un laboratoire, et la physique abordait pour la première fois une question métaphysique...



→ sicien français Alain Aspect : le viol des inégalités de Bell a été manifeste. Et toutes les autres expériences l'ont confirmé depuis : la corrélation des photons face au miroir ne peut être expliquée par une cause commune dans le passé. Rien ne les programme pour se réfléchir ou traverser les miroirs. Mais l'expérience d'Alain Aspect laissait encore une chance à notre sens de la causalité spatio-temporelle de s'en sortir : sans être programmé, le comportement de particules intriquées pouvait en effet être téléphoné. Car il est impossible d'obtenir, en pratique, une parfaite simultanéité entre deux événements dans un laboratoire : du fait d'inévitables imprécisions expérimentales, il y en a obligatoirement un qui se produit une fraction de seconde avant l'autre. On peut donc toujours se dire que la pre-

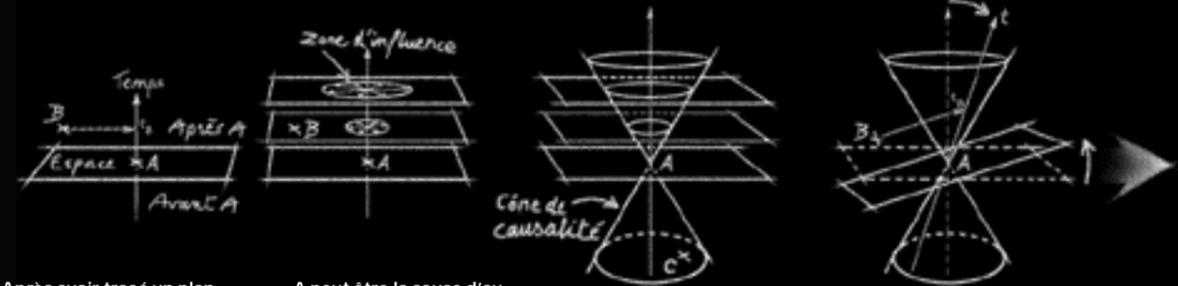
**Rien ne programme les particules à se réfléchir ou à traverser le miroir**

mière particule qui a atteint un miroir a informé sa collègue de son choix pour qu'elle s'y conforme. Autrement dit, si l'on représente l'espace par un plan horizontal et le temps par un axe vertical, les deux événements sont inévitablement décalés verticalement, ce qui autorise alors une communication "téléphonique" (pour ne pas dire "télépa-

thique") entre les deux (voir ci-contre). Oui, mais si tel est le cas, étant donné la distance qui sépare les deux événements dans l'expérience d'Aspect (14 m) et l'incertitude sur le moment précis où ils se produisent (20 milliardièmes de seconde), un rapide calcul montre que cette hypothétique communication entre les deux photons doit avoir une vitesse supérieure à deux fois celle de la lumière ! Une expérience réalisée en 1998 sur 10 km autour de

S. CHIFFREAU

**1905, la théorie d'Einstein : la causalité s'inscrit dans l'espace-temps**



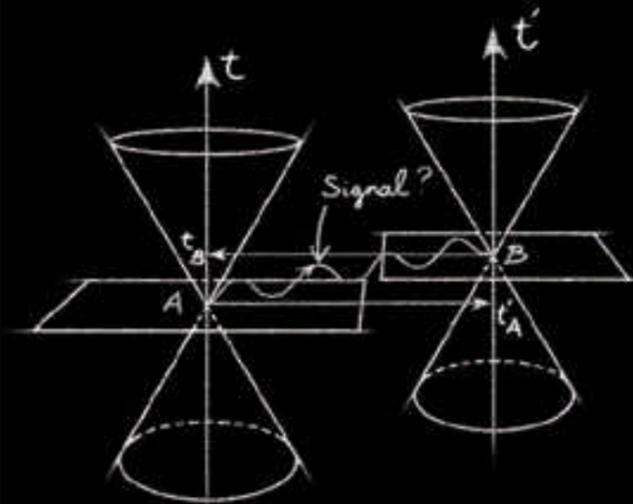
Après avoir tracé un plan horizontal pour l'espace et une flèche verticale pour le temps, tout événement peut être représenté par un point, ici A. Tout ce qui est au-dessus de ce point se déroule après lui (tel B), tout ce qui est en dessous se déroule avant.

A peut être la cause d'autres événements, définissant ainsi dans l'espace une zone d'influence, qui croît au fil du temps (mais pas plus vite que la vitesse de la lumière). Tout événement B situé hors de cette zone n'a aucun lien de causalité avec A.

L'ensemble de ces zones d'influence forme un cône dit de causalité qui s'étend dans le futur. Par symétrie, le cône de causalité s'étend aussi dans le passé, définissant tout événement C ayant pu être la cause de A.

La théorie de la Relativité démontre que si A est en mouvement par rapport à B, le cône de causalité de A reste inchangé, mais ses axes de temps et d'espace apparaissent penchés pour B, modifiant ce qui, pour lui, survient avant ou après.

**1982, l'expérience d'Aspect : la causalité vacille**



Ici, A et B sont immobiles et chacun se situe hors du cône de causalité de l'autre. Il n'existe donc *a priori* aucun lien de causalité entre eux. Or, l'expérience d'Aspect montre l'inverse : A et B se déroulaient de la même manière ! Pour sauver la causalité, il faut donc supposer que A, survenant juste avant B, a envoyé à ce dernier un "signal" allant plus vite que la lumière.

**2002, l'expérience de Suarez : la causalité a disparu**

Maintenant, la même expérience est réalisée avec A et B en mouvement. Chacun s'éloignant de l'autre, leurs axes de temps et d'espace respectifs se penchent donc en sens inverse. Pour A, l'événement B survient alors après lui... et c'est la même chose avec B : pour lui, A se déroule après. Aucun des deux ne peut donc apparaître comme la cause de l'autre. Et nulle causalité ne peut plus expliquer qu'ils se comportent alors de manière identique.



DÉCODAGE > **A LA UNE** Le temps n'existe pas!

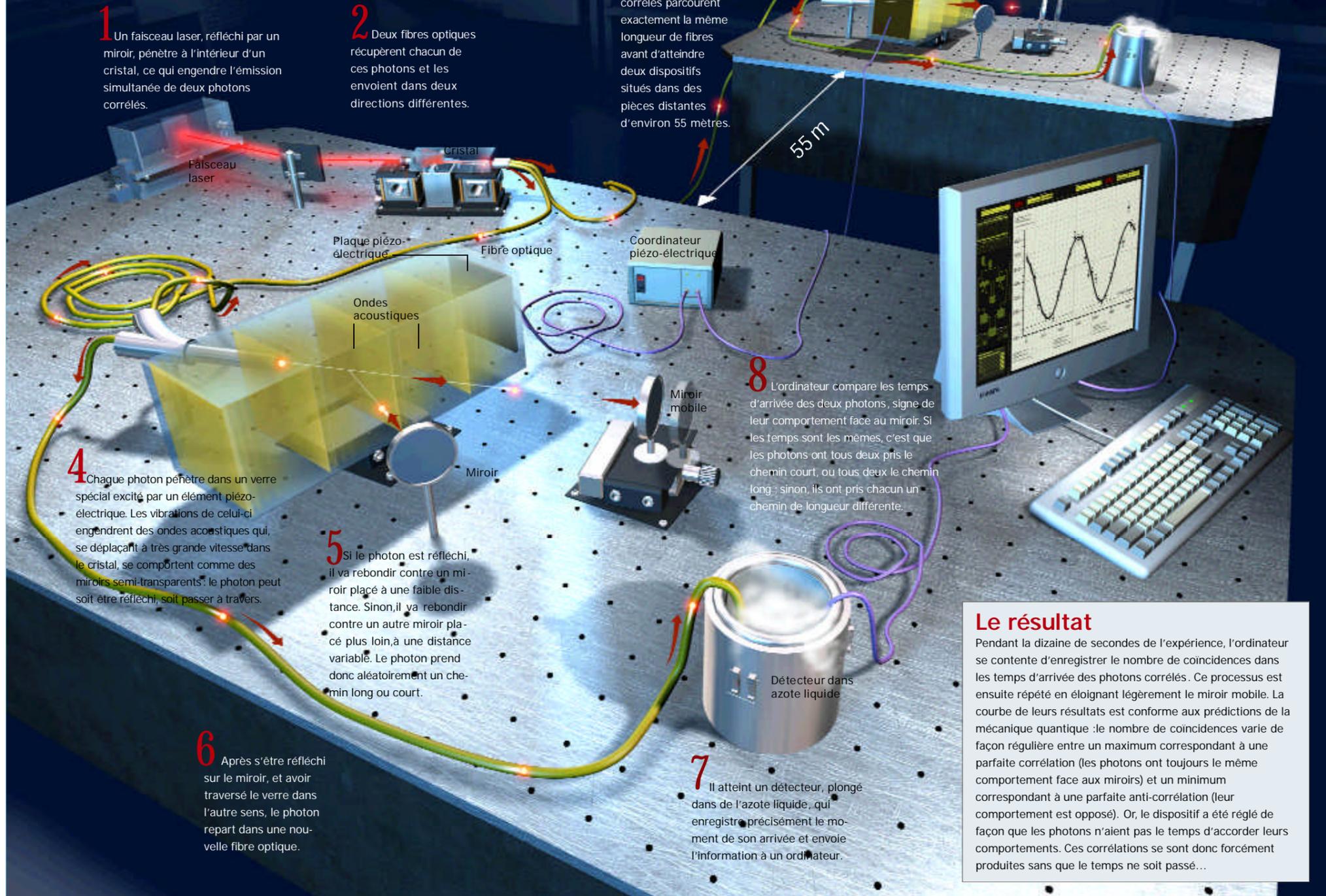
→ Genève par l'équipe du Pr Gisin a même montré qu'elle doit lui être dix millions de fois supérieure... Ce qu'interdit formellement la théorie de la relativité d'Einstein, pour qui aucune information ne peut aller plus vite que la lumière! Doit-on alors violer les principes d'Einstein pour sauvegarder la causalité temporelle?

**DES APPAREILS EN MOUVEMENT**

Alain Aspect a cependant lui-même démontré qu'on ne peut utiliser cet hypothétique signal entre particules intriquées pour transporter de l'énergie, de la matière ou de l'information. De quoi maintenir, donc, une coexistence pacifique entre la mécanique quantique et la théorie de la relativité. Et interpréter à peu près sereinement l'intrication comme une corrélation téléphonée. "Je n'arrive pas à me représenter ce lien autrement que par une espèce d'interaction instantanée, même si je sais que cette interaction est différente des interactions habituelles", nous expliquait il y a quatre ans le physicien (voir Science & Vie, n°980, p.171).

L'expérience réalisée à Genève vient pourtant de ruiner cette façon de voir. Cela fait dix ans qu'Antoine Suarez souhaitait la réaliser. Spécialiste de physique et d'épistémologie, ce chercheur a rencontré à plusieurs reprises John Bell à Genève, quelques années avant sa mort. Il en a gardé une profonde affection pour l'homme, et un intérêt passionné pour l'intrication. Laquelle lui a inspiré une idée toute simple: reproduire l'expérience d'Aspect, mais avec des appareils en mouvement! D'après la théorie d'Einstein, en effet, la structure d'espace-temps se déforme avec le mouvement dans le référentiel immobile du laboratoire, les axes de temps et d'espace d'un appareil en mouvement se penchent, ce qui décale sa propre horloge (voir schéma p. 39). Pour que l'intrication quantique perde la notion d'ordre temporel, il suffit donc

# Une expérience historique!



**1** Un faisceau laser, réfléchi par un miroir, pénètre à l'intérieur d'un cristal, ce qui engendre l'émission simultanée de deux photons corrélés.

**2** Deux fibres optiques récupèrent chacun de ces photons et les envoient dans deux directions différentes.

**3** Les deux photons corrélés parcourent exactement la même longueur de fibres avant d'atteindre deux dispositifs situés dans des pièces distantes d'environ 55 mètres.

**4** Chaque photon pénètre dans un verre spécial excité par un élément piézo-électrique. Les vibrations de celui-ci engendrent des ondes acoustiques qui, se déplaçant à très grande vitesse dans le cristal, se comportent comme des miroirs semi-transparentes: le photon peut soit être réfléchi, soit passer à travers.

**5** Si le photon est réfléchi, il va rebondir contre un miroir placé à une faible distance. Sinon, il va rebondir contre un autre miroir placé plus loin, à une distance variable. Le photon prend donc aléatoirement un chemin long ou court.

**6** Après s'être réfléchi sur le miroir, et avoir traversé le verre dans l'autre sens, le photon repart dans une nouvelle fibre optique.

**7** Il atteint un détecteur, plongé dans de l'azote liquide, qui enregistre précisément le moment de son arrivée et envoie l'information à un ordinateur.

**8** L'ordinateur compare les temps d'arrivée des deux photons, signe de leur comportement face au miroir. Si les temps sont les mêmes, c'est que les photons ont tous deux pris le chemin court, ou tous deux le chemin long; sinon, ils ont pris chacun un chemin de longueur différente.

**Le résultat**  
 Pendant la dizaine de secondes de l'expérience, l'ordinateur se contente d'enregistrer le nombre de coïncidences dans les temps d'arrivée des photons corrélés. Ce processus est ensuite répété en éloignant légèrement le miroir mobile. La courbe de leurs résultats est conforme aux prédictions de la mécanique quantique: le nombre de coïncidences varie de façon régulière entre un maximum correspondant à une parfaite corrélation (les photons ont toujours le même comportement face aux miroirs) et un minimum correspondant à une parfaite anti-corrélation (leur comportement est opposé). Or, le dispositif a été réglé de façon que les photons n'aient pas le temps d'accorder leurs comportements. Ces corrélations se sont donc forcément produites sans que le temps ne soit passé...

L. HINDRYKOWSKI/MULTIMEDIA

## DÉCODAGE &gt; À LA UNE Le temps n'existe pas!

→ que les miroirs et détecteurs de l'expérience s'éloignent suffisamment vite dans des directions opposées : au moment de faire le choix de traverser ou réfléchir le miroir, chaque photon, dans son propre référentiel, sera alors persuadé que l'autre ne l'a pas encore fait ! Aucun ne peut plus prétendre tenir compte du choix de son partenaire... Nulle communication possible ici, à moins d'imaginer qu'une communication puisse remonter le temps, mais il n'y aurait alors plus grand-chose à expliquer dans ce bas-monde...

## EXPÉRIENCE... MÉTAPHYSIQUE

L'enjeu de cette expérience est donc de savoir si l'intrication continue à exister lorsque les particules n'ont plus le temps de communiquer. "Si la mécanique quantique le prédit, souligne Antoine Suarez, aucune expérience ne permettrait de le savoir. Et le préjugé selon lequel la causalité adhère toujours au temps était tellement enraciné dans mon esprit que je pensais que l'on avait une vraie chance de prendre pour la première fois en faute la mécanique quantique !" En prévision, le physicien développa une théorie alternative, dite de la "multisimultanéité", parfaitement conforme à la mécanique quantique, sauf qu'elle respecte la causalité temporelle dans l'intrication et prédit la disparition des corrélations quand la configuration des appareils n'autorise plus de communication dans le temps.

C'est tout le contraire qui va se produire ! En 1992, Antoine Suarez convainc Marcel Odier, banquier genevois intéressé par les implications métaphysiques de la théorie quantique, de financer son expérience à hauteur de 450000 francs suisses (environ 300000 euros). Il se met alors en quête d'un groupe de physique expérimentale, et tombe tout naturellement sur l'équipe du Pr Gisin qui, déjà installée à Genève, détient le record mondial de distance pour l'envoi de photons intriqués contre

> Pour mesurer précisément le temps d'arrivée de chaque photon, des détecteurs sont plongés dans de l'azote liquide, dont la température est inférieure à -200 °C.



▲ Les appareils doivent être méticuleusement disposés sur les plateaux pour que le phénomène d'intrication apparaisse.

des miroirs semi-transparents. "Nous étions tous très excités par le principe de l'expérience et nous avons immédiatement décidé de la mettre sur pied", se souvient Nicolas Gisin. Les problèmes techniques sont cependant énormes : avec une distance maximale de 10 km entre les événements corrélés, il faut que les appareils soient lancés à la vitesse de décollage d'un avion pour faire apparaître la bonne configuration... Comment rendre ces conditions compatibles avec la nécessaire méticulosité d'une expérience quantique ?

A défaut de gros moyens, l'équipe suisse va faire preuve d'imagination... Car la mécanique quantique ne dit pas si le choix du photon s'effectue au moment de sa rencontre avec le miroir ou, plus tard, au moment de sa détection. Du coup, pour mettre le moins possible d'appareils en mouvement, les physiciens décident de faire deux expériences : l'une avec les détecteurs en mouvement, et l'autre avec les miroirs. Le premier cas est le plus simple : les



**"A ce niveau, des choses se passent, mais le temps, lui, ne passe pas"**

ANTOINE SUAREZ, PHYSICIEN AU CENTRE DE PHILOSOPHIE QUANTIQUE DE ZURICH

physiciens utilisent comme détecteur un disque tournant sur lui-même, sur la tranche duquel les photons arrivent, via des fibres optiques. Avec une distance de 10 km entre les deux appareils et une vitesse de rotation du disque de 10000 tours par minute, la configuration est bien "avant-avant" : dans son propre référentiel, chaque appareil est persuadé d'être le premier à détecter sa

particule. Lors de l'expérience, réalisée à l'été 1997 par Hugo Zbinden et Wolfgang Tittel, le résultat est incontestable : le phénomène d'intrication n'a pas disparu.

Restait le plus dur : mettre les miroirs en mouvement. "Nous pensions d'abord utiliser des miroirs massifs, raconte Nicolas Gisin, mais Hugo Zbinden a eu l'idée des ondes acoustiques." L'idée est excellente. Car une onde acoustique dans un verre agit sur la lumière comme un miroir semi-transparent : la moitié des photons est réfléchi, tandis que l'autre passe à travers. De plus, étant donné la vitesse de propagation de ces ondes (9000 km/h), l'expérience peut être réalisée à l'intérieur du bâtiment de l'université... C'est André Stefanof, qui prépare sa thèse dans le groupe de Genève, qui va s'en charger (voir infographie). Pour corser le tout, les physiciens réalisent aussi l'expérience en faisant se rapprocher les miroirs et les détecteurs, au lieu de les éloigner. Ce n'est alors plus une configuration "avant-avant" qui est proposée, mais "après-après" : lorsqu'il doit faire son choix, chaque photon est persuadé que son partenaire l'a déjà fait et est donc censé s'y confor-

P. GOETHEL/LOCK

## LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE SUR LES RAILS

Dès les années 20, la mécanique quantique prédisait la possibilité que les destins de deux particules puissent être intimement liés... par-delà le temps et l'espace ! Il aura pourtant fallu quatre-vingts ans pour que cette "intrication" trouve la place qu'elle mérite. Car si Albert Einstein a souligné l'importance philosophique de ce phénomène, si John Bell a réussi à le quantifier et si Alain Aspect l'a fait rentrer dans les laboratoires, "jusqu'à la fin des années 80, la physique dominante considérait que ce n'était pas un sujet intéressant", souligne Nicolas Gisin. Mais aujourd'hui, on se rend compte que

quasiment tous les états quantiques sont intriqués et ce phénomène devient l'élément central et fondamental de la physique quantique. La question principale est maintenant : que faire de cette ressource ? Le physicien suisse a déjà une idée précise en tête. Avec trois collègues de l'université de Genève, il a fondé, en octobre 2001, ID Quantique, une start-up dont le but est de développer un système cryptographique inviolable basé sur cette intrication. De fait, la réception de photons "intriqués" est ici une solution idéale et garantit déjà, via un protocole sophistiqué, une totale sécurité

dans les communications. "La difficulté actuelle est d'augmenter la distance entre les interlocuteurs, explique Grégoire Ribordy. Mais je pense que les banquiers genevois pourront utiliser ce système dès 2004." La course à la cryptographie quantique est lancée : MagiQ Technologie, basée à New York, qui développe un système semblable, a reçu il y a quelques mois 6,9 millions de dollars de la part d'investisseurs privés pour commercialiser son produit à la fin 2003. L'intrication quantique pourrait ainsi se révéler vitale pour les militaires, les gouvernements et les grandes sociétés...

mer ! Chacun attend le choix de l'autre... et donc aucun ne choisit.

"Le matin du 22 juin 2001, se souvient Antoine Suarez, les premiers résultats sont tombés. J'ai eu le sentiment d'assister à mon enterrement : l'intrication quantique n'avait pas disparu, ce qui confirmait la théorie quantique et invalidait ma théorie de la multisimultanéité. Mais un peu plus tard, quand j'ai compris que cela invalidait la causalité temporelle, j'ai éprouvé une grande satisfaction. Finalement, la mécanique quantique nous avait parlé." Car il faut s'y résoudre : la causalité spatio-temporelle, si efficace pour appréhender notre monde, ne peut plus expliquer pourquoi des photons se comportent de la même façon en face de miroirs, alors qu'ils ne se sont pas mis d'accord auparavant sur leur futur comportement ni échangé de signaux au moment de leur choix. "L'intrication ne

respecte aucune horloge", conclut Valerio Scarani, théoricien du groupe de Genève.

"Ce résultat est d'une grande importance culturelle, reprend Antoine Suarez. L'expérience d'Aspect montrait la non-localité de l'intrication quantique, les particules se comportant comme s'il n'y avait pas de distances entre elles. Mais ce n'était que la moitié de la vérité : notre expérience montre, elle, la non-temporalité de ce phénomène. Il y a une dépendance entre événements, mais cette dépendance ne correspond à aucun ordre temporel. Le monde quantique ne peut plus être défini en termes d'"avant" et d'"après". Des choses se passent, mais le temps, lui, ne passe pas." Plus qu'une expérience de physique, c'est aussi une expérience métaphysique qui s'est déroulée à Genève : dans la ville de l'horlogerie, le temps, pendant un instant, s'est arrêté. Z