

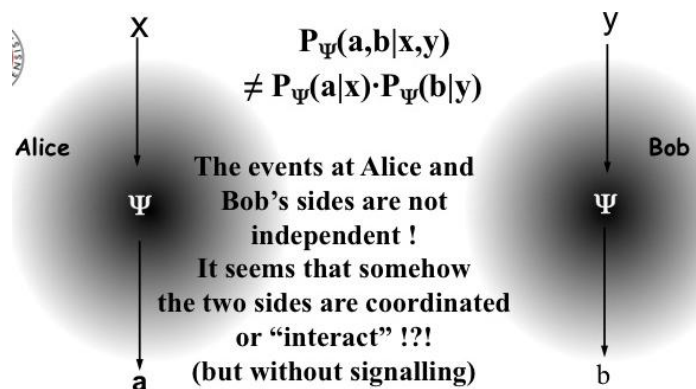
Collège de physique et de philosophie Séance du 10 décembre 2012

Bernard d'Espagnat. Je ne présente pas Nicolas Gisin, que tous les experts connaissent – et même au-delà, puisqu'il s'est fait connaître d'un public plus large de physiciens et de scientifiques lorsqu'il a conduit l'expérience qu'il va nous présenter aujourd'hui. Pour expérimenter la non-séparabilité, il a mis les photons d'Alain Aspect dans des fibres optiques pour les envoyer loin l'un de l'autre, à Bernex et Bellevue, deux villages distants d'une douzaine de kilomètres. Ce problème est alors sorti du cercle des initiés pour toucher un public plus vaste. Sans compter d'autres expériences très intéressantes, en particulier celle dite *before-before*. J'espère qu'il aura également l'occasion de nous en parler. En tout cas, Nicolas Gisin nous a fait le plaisir de venir nous présenter son expérience « non-localité quantique et relativité ». Nous lui en sommes très reconnaissants.

Section I – Exposé par Nicolas GISIN

1. La non-localité quantique

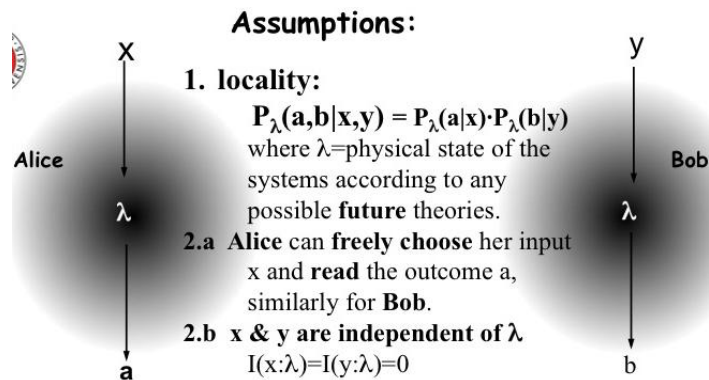
Dans le paradigme qui nous occupera aujourd'hui, différents personnages (Alice et Bob) ont chacun un système physique (électron, photon, etc.), décrit par la physique quantique, et se trouvent dans un certain état. Le halo que je fais figurer dans le schéma suivant signifie qu'il n'importe pas tant qu'Alice soit très clairement délimitée, mais qu'elle ne s'étende pas jusqu'à Bob et vice-versa. Nous arrivons donc à poser des questions (x pour la question posée à Alice, ou la mesure qui sera faite sur la particule d'Alice, et y pour la question posée à Bob) et à récupérer une réponse (a pour la réponse du système d'Alice et b pour la réponse du système de Bob).



Plusieurs exemples d'états et de mesures témoignent de cette non-séparabilité. La probabilité conditionnelle d'obtenir les résultats a et b , conditionnés après avoir posé les questions x et y , ne factorise pas. Chez Alice et Bob, les événements ne sont donc pas indépendants. Enfin, ces systèmes spatialement séparés ne sont pas logiquement séparés. Telle est la non-localité quantique – vous connaissez tous cela ! Mais on peut aller bien plus loin. En effet, nous avons considéré que cette théorie était peut-être incomplète et qu'il faudrait la compléter par des variables supplémentaires, en conservant le même scénario et en faisant l'hypothèse de localité de Bell.

Conditionnée à des variables supplémentaires, qui peuvent inclure l'état quantique, nous observons la séparabilité ou la factorisation des probabilités. La deuxième hypothèse

nécessaire dans ce contexte est qu'Alice et Bob peuvent librement choisir leurs paramètres de mesure (x pour Alice, y pour Bob). Techniquement, cela signifie que l'information mutuelle entre le choix d'Alice ou Bob et leurs variables supplémentaires est nulle et donc que x et y sont indépendantes.



Avec ces hypothèses minimales, nous pouvons dériver les inégalités de Bell. Je ne peux pas vous le montrer ici, mais je suis de toute façon persuadé que vous connaissez tous cela très bien. En revanche, vous vous interrogez sans doute sur ces λ . Cette question est souvent passée sous silence. Historiquement, les λ sont des variables locales cachées, attachées aux particules. Mais elles peuvent également être considérées de façon beaucoup plus générale. Nous pourrions par exemple considérer que λ est l'état physique de tout l'univers et que seuls les choix d'Alice et Bob ne peuvent pas être décrits par elle, car ils doivent être indépendants. Il existe donc deux possibilités : soit des variables attachées aux systèmes, soit des variables très globales – néanmoins locales du fait de la condition de localité. Ces hypothèses ont plusieurs conséquences expérimentales, que je souhaite vous présenter maintenant.

2. Conséquences expérimentales

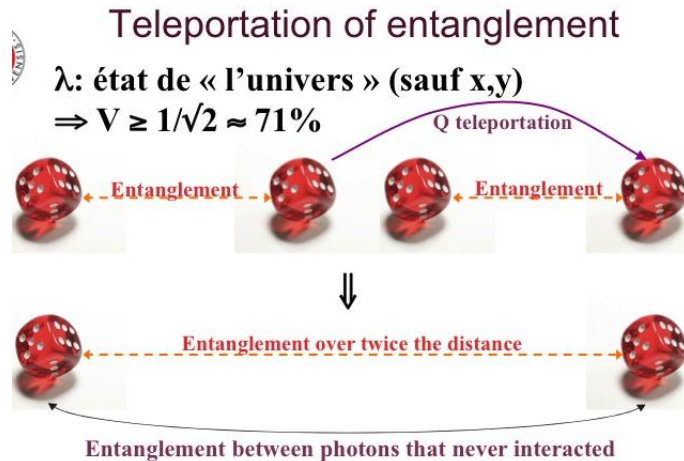
Une première conséquence expérimentale s'observe quand nous faisons de la permutation ou **téléportation d'intrication**.



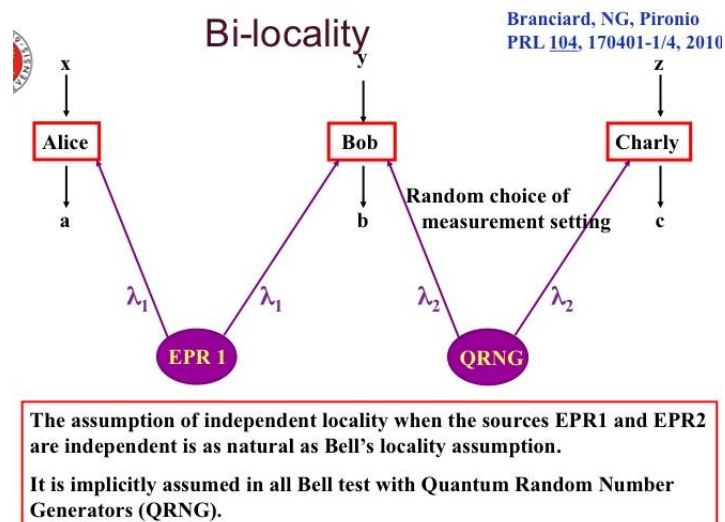
N. Gisin, Non-realism : deep thought or a soft option ? quant-ph/0901.4255, Found. Phys. 42, 80-85 (2012)
 NG, Quantum nonlocality : how does nature do it ?, Science, 326, 1357, 2009

Dans le schéma ci-dessus, nous obtenons de l'intrication sur une distance plus grande, mais surtout entre des photons ou des particules qui ne se sont jamais vu.

Si nous supposons que λ est l'état de l'univers sauf x et y , la visibilité dont nous avons expérimentalement besoin pour démontrer la non-localité est ce fameux $1/\sqrt{2}$ (environ 71 %) que vous connaissez certainement.

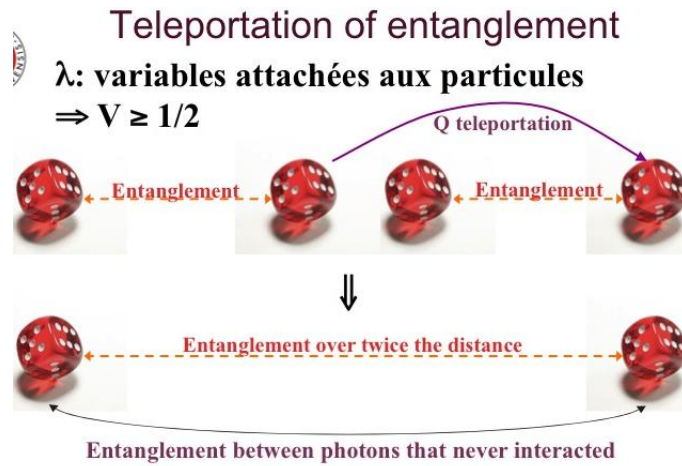


Si nous partons de l'idée que les λ sont des variables attachées à des particules dans cette expérience de téléportation d'intrication, les deux sources EPR1 et EPR2 peuvent être totalement indépendantes. L'une peut être alimentée par l'énergie solaire et l'autre par de l'énergie nucléaire, par exemple. Il faut simplement imaginer qu'il existe des choses indépendantes dans l'univers. Dans ce cas, la première source produit des paires de particules intriquées, selon la théorie quantique, et des variables supplémentaires λ_1 . La seconde produit une autre paire de particules intriquées et des variables supplémentaires λ_2 . Ce ne sont plus des variables de l'univers, mais des variables attachées aux particules.



Les sources étant indépendantes, il est alors très naturel de faire l'hypothèse que λ_1 et λ_2 sont indépendantes. En fait, il s'agit d'une hypothèse que nous faisons implicitement dans chaque test de Bell. En effet, nous utilisons un générateur de nombre aléatoire quantique (*Quantum Random Number Generator*, ou QRNG). Il faut alors supposer que cette source d'aléatoire est indépendante des variables λ_1 . A défaut, le choix de Bob serait prédéterminé.

Cette hypothèse n'est pas vraiment nouvelle, mais si nous la faisons dans ce contexte de téléportation d'intrication, une visibilité strictement supérieure ou égale à 0,5 est suffisante.



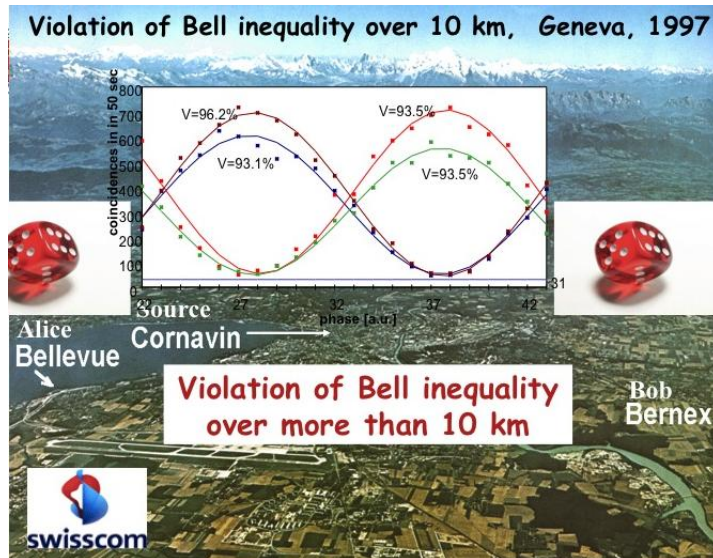
Branciard, NG, Pironio, PRL 104, 170401-1/4, 2010.
 Physical Review A, 85, 032119-1/21, 2012

Au final, une expérience de non-localité est plus simple à réaliser si nous imaginons que les variables λ supplémentaires sont attachées aux particules, plutôt que si nous imaginons qu'elles sont l'état de l'univers.

Une autre expérience intéressante, de **violation des inégalités de Bell**, a été conduite par Alain Aspect en 1982 puis, 15 ans plus tard, dans notre laboratoire – qui est un peu plus grand !

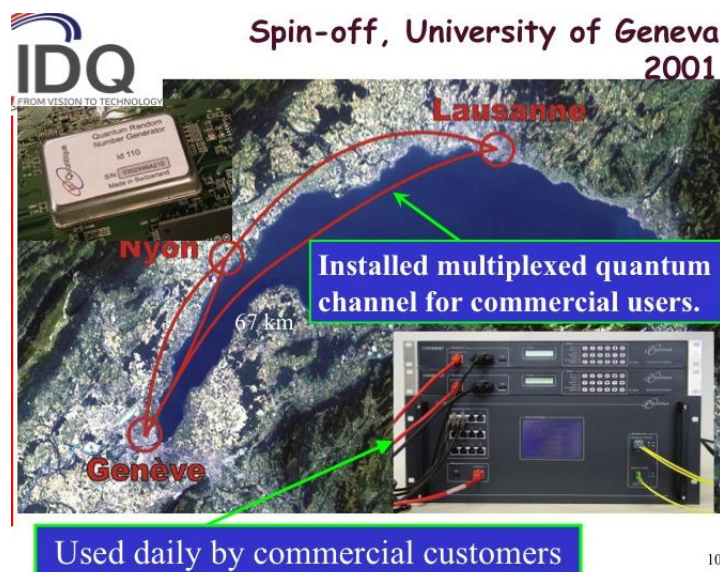
Tests of Bell's inequality:
 Aspect's 1982 experiment





Ces expériences permettent de retrouver des franges d'interférences dans les coïncidences. Il s'agit d'interférences à deux photons, qui permettent de violer les inégalités de Bell sur plus de dix kilomètres.

Depuis, il est intéressant de noter que la **cryptographie quantique** (sécurité fondée sur l'intrication et la non-séparabilité) a complètement changé le biotope dans lequel j'évolue. Tout à coup, il y a de l'argent ! La spin-off IDQ de l'université Genève ou encore une banque de Genève disposent d'un système de sauvegarde à Lausanne, à 67 kilomètres.



Toutes les informations transitent par la fibre optique. Alice et Bob établissent une clé cryptographique, utilisée ensuite par les autres entités pour encrypter et décrypter l'information.

3. Comment la nature s'y prend-elle pour coordonner Alice et Bob ?

Comment deux endroits de l'espace-temps peuvent-ils se coordonner à distance ? Comment un événement a peut-il savoir qu'il est corrélé de façon non-locale avec un autre événement b ? Qui garde trace de qui est intriqué avec qui ? Cette information réside-t-elle dans notre espace à trois dimensions, ou bien des « anges » manipulent-ils d'énormes espaces de Hilbert ?

Je pense qu'il s'agit de bonnes questions, que n'importe quel physicien curieux devrait se poser. Je n'ai pas besoin de vous en convaincre. Mais la plupart de nos collègues n'y prêtent guère intérêt. Pourtant, avoir la possibilité de faire du traitement quantique de l'information sans se préoccuper du détail de fonctionnement des appareils de mesure est une excellente motivation.

Exploit quantum nonlocality for cryptography

Alice

$x=0 \text{ or } 1$

Bob

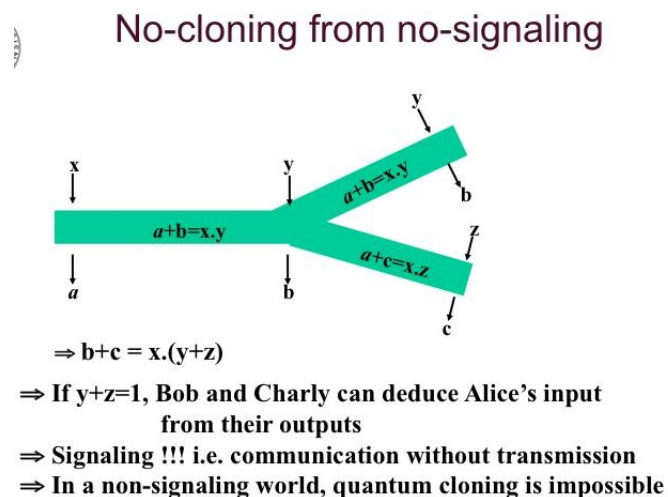
$y=0 \text{ or } 1$

If $p(a,b|x,y)$ violates some Bell inequality, then $p(a,b|x,y)$ contains secrecy irrespective of any detail of the implementation !

After publicly announcing a fair sample of their data,
Alice and Bob's information is entirely contained
in the conditional probability
 $p(a,b|x,y)$

PRL 98, 230501, 2007; PRL 97, 120405, 2006; NJP 11, 1, 2009 ¹³

Cette expérience est très proche de celle d'une inégalité de Bell, avec Alice et Bob et des appareils de mesure de chaque côté auxquels il n'est pas besoin de faire confiance. Tout ce qu'il faut savoir, c'est qu'Alice peut choisir de faire la mesure 0 ou la mesure 1. D'aucuns parlent de polarisations horizontales et verticales, ou de polarisation à plus ou moins 45 degrés – tout dépend si la réflexion porte sur la sphère de Poincaré ou dans l'espace direct. Mais en fait, peu importe. La seule chose qui importe est la possibilité de faire un choix binaire, aussi bien pour Alice que pour Bob.



Il faut d'abord échanger quelque chose de quantique (en l'occurrence des photons dans la pratique, mais cela n'a aucune importance en principe). Ensuite, Alice choisit ses paramètres de mesure et collecte les résultats et Bob fait de même – à l'instar de ce qui se passe dans une inégalité de Bell. En revanche, Alice et Bob annoncent uniquement un échantillonnage de leurs données, suffisant pour établir des statistiques. Et ces statistiques permettront d'estimer la probabilité conditionnelle d'obtenir les résultats a et b dans le cas où Alice et Bob ont fait les mesures x et y .

Ce qui a vraiment changé le monde de l'information quantique, c'est que si cette corrélation viole une inégalité de Bell (CHSH ou n'importe quelle autre inégalité), elle contient nécessairement du secret – ce qui est très précieux dans notre société. Les gens sont prêts à payer pour cela ! Donc plutôt que de parler des inégalités de Bell, nous pouvons affirmer que nous pouvons fabriquer du secret. C'est très précieux pour financer les expériences dont je vais vous parler.

Roger Balian. Comment le secret est-il défini ?

Nicolas Gisin. Les résultats a et b ne peuvent pas être connus par une tierce personne. C'est du secret au sens intuitif, qui peut se mesurer en termes d'informations mutuelles.

Imaginons que nous avons Alice à gauche et Bob à droite, avec leurs inputs, et que l'objectif est de satisfaire autant que possible à l'équation $a + b = x*y$. Je précise qu'il s'agit ici d'une addition modulo 2 et que a , b , x et y sont des bits (0 ou 1), que nous additionnons pour que la somme des outputs soit égale aux produits des inputs. Je précise que satisfaire cette équation au mieux est exactement équivalent à l'inégalité de CHSH.

Supposons maintenant que nous puissions cloner ce système (photon ou électron). Nous en obtenons alors deux. S'il s'agit d'un clone parfait, l'original satisfera $a + b = x*y$. En revanche, le clone avec Alice satisfera $a + c = x*z$ (z étant l'output local et c son résultat). C'est l'idée selon laquelle une tierce personne pourrait essayer de copier le système entre Alice et Bob pour obtenir de l'information – ce qui serait contraire au secret. Mais c'est impossible.

En effet, si nous additionnons les deux équations (il s'agit toujours d'une addition modulo 2), nous obtenons toujours zéro ($0+0 = 0$ ou $1+1 = 0$) et l'équation $b + c = x(y + z)$. Si c'était possible, nous pourrions imaginer que Bob et Charlie décident de ne pas décider : l'un choisirait la mesure 0 et l'autre, la mesure 1. Les deux choix pouvant être faits en même temps, ils mesurent à la fois la polarisation horizontale (original) et la polarisation verticale (copie). Dans ce cas, $0+1 = 1$, donc $b + c = x$, $b + c$ étant la seule addition des résultats de Bob et de Charlie, qui leur indiquerait quel choix a été fait par Alice à distance.

Il serait donc possible de communiquer à une distance arbitraire, en un temps infinitésimal (le temps de faire une mesure). Il y aurait donc une communication plus rapide que la lumière, et même communication d'Alice vers la paire Bob/Charlie sans que rien ne se déplace d'Alice vers Bob/Charlie. Il s'agit de *signalling*, ce que j'appelle une communication non-physique, étant entendu que dans une vraie communication, quelque chose doit porter l'information.

Avec des mathématiques absolument élémentaires, nous pouvons donc montrer que ces systèmes ne peuvent pas être clonés. Dès lors, il y a du secret. Telle est l'intuition de la raison de l'existence de secret dans la violation des inégalités de Bell. Nous faisons l'hypothèse que l'équation est systématiquement satisfaite. Dans la réalité, d'après la théorie quantique, elle n'est satisfaite que très souvent, pas à chaque fois. En tout cas, l'intuition est là.

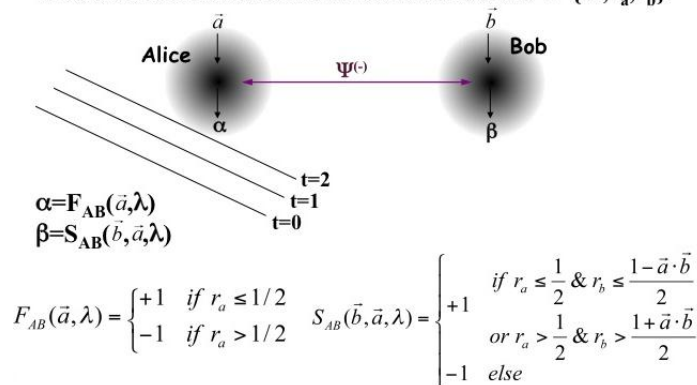
Une question demeure, qui me turlupine depuis des dizaines d'années – depuis que je vous ai entendu parler au Cern, Monsieur d'Espagnat, à l'époque de John Bell : comment fait la nature ? Comment les endroits dans l'espace-temps peuvent-ils se coordonner sans s'être mis d'accord à l'avance, puisqu'il y a violation des inégalités de Bell, et sans communiquer ?

L'une des premières idées qui peuvent venir à l'esprit, une fois écartées les variables locales (c'est-à-dire une fois qu'il y a eu violation des inégalités de Bell, comme l'a montré Alain Aspect), est d'aller voir des variables non-locales.

Ici, je me contenterai de variables non-locales déterministes (les variables non-locales probabilistes relevant de la physique quantique), en commençant depuis un référentiel où Alice fait la mesure en premier et Bob en second.

Deterministic nonlocal hidden variables

Let's try to add randomness, given from the beginning, to turn stochastic events into deterministic ones: $\lambda = \{\Psi, r_a, r_b\}$.



Dans cette expérience, les variables supplémentaires λ ne sont pas locales. Il n'y a pas d'hypothèse de factorisation à la Bell.

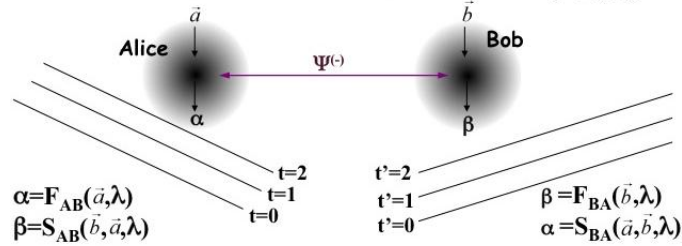
Si Alice est la première à faire sa mesure (*F* signifiant *first*), son résultat (α) est une fonction – parce que c'est déterministe – de sa mesure et de la variable supplémentaire. Puis Bob effectue sa mesure en second (*S* signifiant *second*). Son résultat (β) est une fonction qui peut dépendre de sa mesure, mais aussi de la mesure de A (car c'est non-local) et de l'usage non-local de la variable.

Il est parfaitement possible que de telles fonctions existent. C'est d'ailleurs le cas des programmes d'ordinateurs qui illustrent les cours de physique quantique et qui peuvent simuler des corrélations quantiques. L'ordinateur est déterministe, et il a le même λ pour simuler Alice et Bob. Quand il simule le résultat de Bob, il tient compte de celui d'Alice. Dans ces simulations, il y a une communication entre Alice et Bob, l'information sur le choix d'Alice parvenant à Bob.

Faisons la même expérience de pensée depuis un référentiel dans lequel Bob est le premier à effectuer la mesure. Son résultat est une fonction de sa mesure et de son λ . Puis Alice effectue la mesure en second. Son résultat dépend des deux paramètres de mesure et de λ .

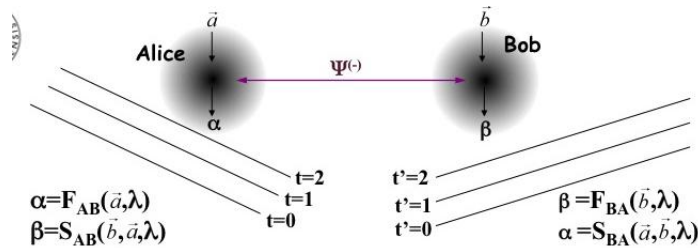
Deterministic nonlocal hidden variables

Let's try to add randomness, given from the beginning, to turn stochastic events into deterministic ones: $\lambda = \{\Psi, r_a, r_b\}$.



Ajoutons une autre hypothèse, très naturelle : nous voudrions que les résultats vus depuis le premier référentiel soient les mêmes que ceux vus depuis le deuxième référentiel. Après tout, le choix du référentiel depuis lequel les résultats sont regardés est parfaitement arbitraire.

Existe-t-il un modèle de variables déterministes non-locales (λ et fonctions) de telle sorte que le α vu par Alice et le α vu par Bob s'il est le premier à faire la mesure soient identiques ?



Could there be $\lambda, F_{AB}, S_{AB}, F_{BA}$ and S_{BA} s.t.
 $F_{AB}(\vec{a}, \lambda) = S_{BA}(\vec{a}, \vec{b}, \lambda)$?

Theorem: NO !

Proof: S_{BA} would be independent of \vec{b} Impossibility of covariant deterministic nonlocal hidden-variable extensions of quantum theory
 \Rightarrow locality \Rightarrow Bell inequality. NG, PRA 83, 020102, 2011

Quantum correlations can't be described with local variables, nor can they be described with deterministic nonlocal variables.

19

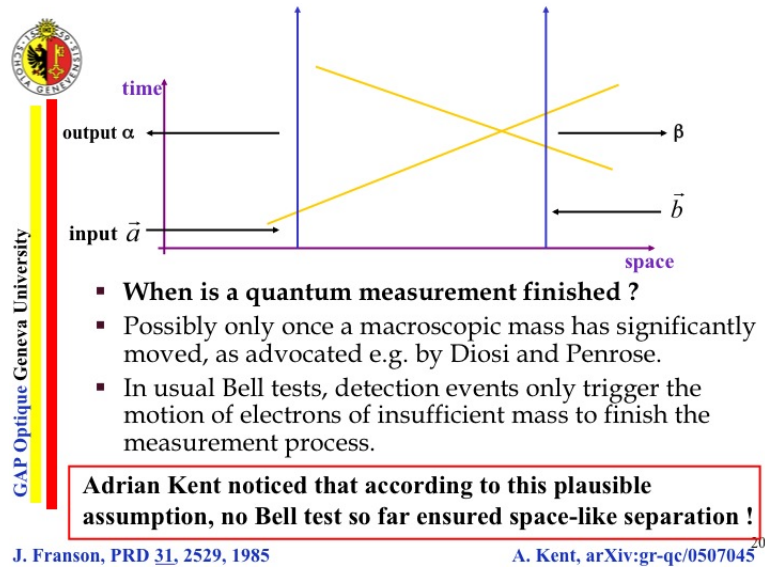
Il est très simple de montrer que c'est impossible. En effet, pour que cette égalité soit satisfaite, puisqu'il n'y a pas de vecteur b d'un côté il ne peut pas y avoir de l'autre. Or si nous retirons le vecteur b , nous avons la condition de localité de Bell.

Tout autant qu'il est impossible de décrire les corrélations quantiques avec des variables locales, il est également impossible de les décrire avec des variables non-locales déterministes co-variantes.

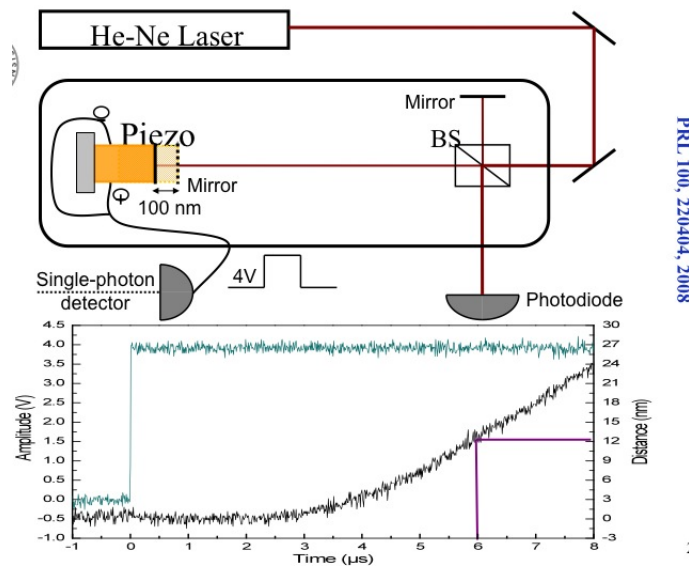
Aller simplement vers des variables non-locales n'est pas suffisant. Une autre piste doit donc être explorée, déjà énoncée d'ailleurs en 1985 par Jim Franson à la suite des expériences d'Alain Aspect. Quand une mesure quantique est-elle véritablement finie ?

L'information sur le choix de la mesure d'Alice ne peut pas arriver à Bob avant que Bob ne fournisse son résultat – et il en est de même dans l'autre sens. Plusieurs chercheurs, dont Diosi et Penrose, relient le problème de la non-localité à celui de la mesure. Ils considèrent qu'en physique quantique, une mesure est assez vague. Nous ne savons pas très bien quand elle est terminée. Peut-être est-ce lié à la gravitation, par exemple au déplacement d'une masse macroscopique ? Or dans une expérience de Bell, le résultat est juste une

avalanche d'électrons, avec une masse absolument infime. Si le processus de mesure est vraiment lié à la gravitation, aucun test des inégalités de Bell n'a jamais vraiment garanti une séparation du genre espace, ainsi qu'Adrian Kent l'a observé. En fait, cela prend beaucoup trop de temps pour que la mesure soit vraiment terminée. Elle n'est terminée que bien plus tard, une fois qu'un disque dur se met à tourner dans un ordinateur pour enregistrer les résultats, et non au moment de l'avalanche.



Cette idée nous semblant particulièrement intéressante, car très stable, nous avons fait l'expérience suivante.



Nous faisons en sorte que la diode à avalanche qui détecte le photon pilote immédiatement un élément Piezo, qui va pousser un miroir. La position de ce miroir est contrôlée par un laser local, de telle sorte que nous puissions la mesurer. Nous faisons ensuite exprès de déplacer un objet macroscopique. Certes, ce n'est pas un gros objet, mais il est bien plus gros que quelques milliards d'électrons. Cela prend du temps de pousser un miroir : lorsque nous commençons à pousser le miroir, il faut 6 microsecondes pour le déplacer de 12 nanomètres.

D'autre part, d'après la théorie de Diosi et Penrose, il existe des formules, donc de vraies prédictions – ce qui permet des tests.

Diosi-Penrose formula for collapse time of the superposition: $\psi_1 + \psi_2$

- Diosi's equation

$$\tau_d^{-1} = \frac{Gm^2}{2\hbar} \iint d^3r d^3r' \frac{(|\psi_1(r)|^2 - |\psi_2(r)|^2)(|\psi_1(r')|^2 - |\psi_2(r')|^2)}{|r - r'|}$$

- For a parallelepiped mirror

$$\tau_d = \frac{3\hbar V}{2\pi G m^2 d^2}$$

- Numerical application in our case

$$\tau_d = 1 \mu s$$

$$m = 2 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$$

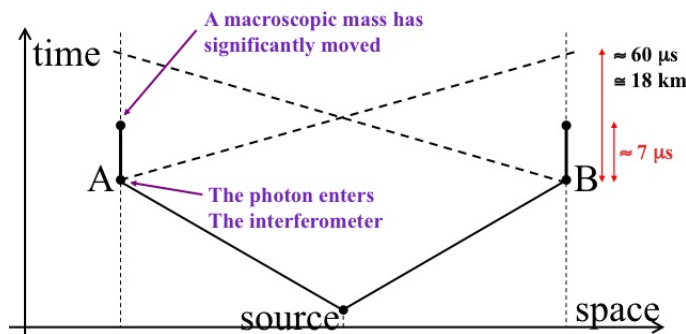
$$d = 12.6 \text{ nm}$$

$$V = 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm} = 9 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$$

Ces prédictions indiquent que pour 2 microgrammes, une distance de 12 nanomètres et un certain volume du miroir, la réduction du paquet d'onde prend environ une micro seconde. Au total, il faut donc 7 microsecondes pour faire la mesure. Dans cette durée, la lumière se déplace sur 2 kilomètres environ – distance qui n'existe pratiquement jamais dans un laboratoire pour faire cette expérience. Avec notre laboratoire sur 18 kilomètres, nous pouvons avoir 60 microsecondes. Nous sommes donc quasiment un ordre de grandeur plus rapides que le temps qu'il faut pour terminer la mesure selon le modèle de Diosi et Penrose.

Pour illustrer que c'est une vraie expérience, nous trouvons comme il se doit des coïncidences et des franges d'interférences.

Bell test with true space-like separation



In usual Bell tests, detection events only trigger the motion of electrons of insufficient mass to finish the measurement process.

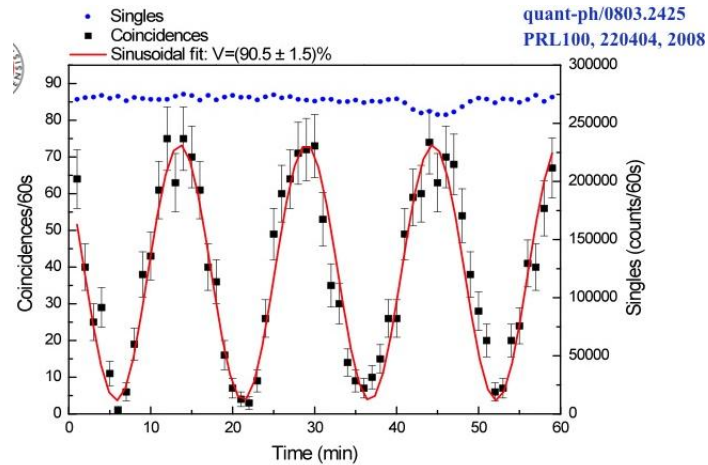
[quant-ph/0803.2425](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0803.2425)

[PRL 100, 220404, 2008](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0803.2425) 2.

La visibilité est d'environ 90 %, c'est-à-dire suffisante pour violer les inégalités de Bell. Dans un certain sens, c'est la première expérience de corrélation non-locale avec une réelle séparation du genre espace. Certes, Alain Aspect l'a faite avant nous, mais il ne poussait pas un miroir. Tout dépend jusqu'où nous voulons aller dans cette quête de compréhension d'un mécanisme derrière les corrélations non-locales. En l'occurrence, ces

résultats ne me suffisent toujours pas ! Et pour cause, la question de la façon dont la nature s'y prend reste posée.

Nous avons donc une non-séparabilité, c'est-à-dire le fait que les probabilités conjointes ne factorisent pas.



Visibility > 90% ⇒ nonlocal correlations between truly space-like separated events.

Cette hypothèse suggère fortement que c'est comme si Alice influençait Bob, ou l'inverse. Les ouvrages de mécanique quantique le décrivent en indiquant qu'Alice fait une mesure, ce qui réduit la fonction d'onde et change l'état du système de Bob. La mesure chez Alice influence donc l'état quantique chez Bob. Cette idée mérite d'être certainement poursuivie.

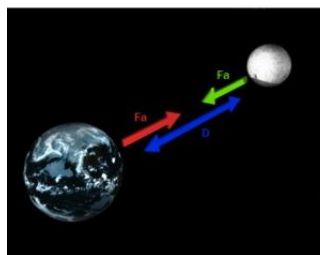
Pour sa part, Einstein parlait « d'action fantôme à distance », avec une action de A sur B ou de B sur A. Nous avons essayé de sérieusement considérer cette hypothèse, en la testant.

Je vous présente ici plusieurs résultats expérimentaux et théoriques.

Nous faisons l'hypothèse que l'influence va à une vitesse finie, en se propageant de proche en proche. Dans un moment, elle ira éventuellement plus vite que la lumière, mais tout de même de proche en proche. Ce n'est pas de la non-localité instantanée, mais un principe de continuité. Pouvons-nous décrire ce mécanisme de corrélations quantiques avec un mécanisme qui se propagerait de proche en proche, quitte à aller plus vite que la lumière ?

Pour l'illustrer, nous recourons à une autre forme de non-localité : celle qui est associée à la théorie de la gravitation de Newton, selon laquelle le déplacement d'un caillou sur la Lune aurait immédiatement – donc à vitesse infinie – un effet sur le champ gravitationnel terrestre.

Newton's Nonlocality



A stone moved on the moon would **immediately** affect the gravitational field on earth.

How can these two locations out there in Space-time know about each other ?

Comment la Terre fait-elle pour savoir qu'un rocher a été déplacé sur la Lune ? Il est intéressant de lire ce que Newton disait à propos de sa propre théorie de la gravitation universelle : « Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide, sans la médiation de quelque chose pour transporter l'action et la force de l'un à l'autre, cela est pour moi une si grande absurdité qu'à mon avis aucun homme ayant une faculté de réfléchir avec compétence les problèmes philosophiques ne peut y tomber ». En d'autres termes, il faut être complètement incompetent pour croire à la non-localité ! Néanmoins, la théorie de Newton a survécu durant des siècles, jusqu'à Einstein.

Si quelqu'un avait pu faire l'expérience de pensée de déplacer un caillou sur la Lune – certes, personne ne pouvait la faire, sinon en expérience de pensée –, il aurait falsifié la théorie de la gravitation universelle de Newton, et cela aurait permis de mesurer directement la vitesse de la gravitation, ou la vitesse des gravitons qui informent la Terre et la Lune de ce qui se passe de l'autre côté. Il serait alors apparu qu'ils se déplacent à la vitesse de la lumière. Étonnamment, cette expérience n'a toujours pas été faite et elle est probablement impossible à faire avec les technologies actuelles. Et pour cause, la mesure du champ de gravitation doit être faite avec une immense précision et en moins d'une seconde, car à défaut, la configuration ne serait plus celle du genre espace. Pour ma part, ce n'est pas cette expérience que je souhaite faire, mais des expériences similaires de corrélation quantique.

Revenons à Alice et Bob. Au moment où Alice fait son choix de mesure, une certaine influence va chez Bob, de telle sorte qu'au moment où il fait sa mesure, il connaît tout : l'état de ses λ , c'est-à-dire de ses systèmes, son paramètre de mesure et celui d'Alice. A ce moment-là, il n'est donc pas difficile d'avoir des corrélations qui violent des inégalités de Bell. C'est mécanique. Quelque chose a porté l'information d'Alice jusqu'à Bob.

Assume a real influence propagating faster than light but with finite speed



Pour faire ce test, il faut poser les questions aux particules d’Alice et Bob en même temps, de telle sorte que l’influence arrive beaucoup trop tard et que Bob réponde avant de l’avoir reçue. C’est exactement la même idée que pour les gravitons avec la Terre et la Lune.

Nous l’avons fait dans notre laboratoire, en posant à la question à Alice et Bob (Satigny et Jussy). Poser une question, c’est choisir la valeur du modulateur de phase. Nous l’avons fait avec une très bonne synchronicité. Certes, la synchronicité n’est pas un concept absolu et il y a la relativité. Il faut donc définir un référentiel. Nous avons considéré que si l’influence va plus vite que la lumière, il faut qu’elle soit définie dans un certain repère universel privilégié, par exemple celui dans lequel le fond micro-ondes qui baigne tout l’Univers est isotrope. Par rapport à ce repère, nous nous déplaçons à environ par 360 kilomètres par seconde. La relativité n’interdit certainement pas l’existence de repères particuliers. Nous pouvons donc imaginer qu’il existe un repère particulier – peut-être celui que je viens d’évoquer, peut-être un autre, avec une vitesse supraluminique ? Le problème est qu’on ne le connaît pas.

Let’s test this hypothetical preferred

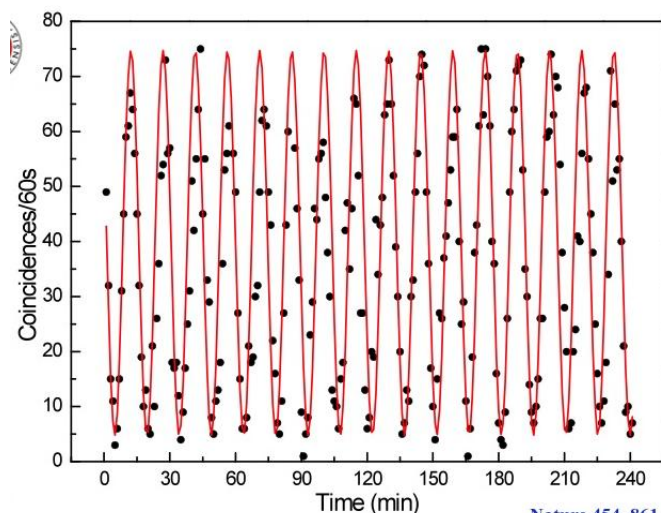
reference frame



Alice and Bob,
east-west orientation,
perfect synchronization
with respect to earth
⇒ perfect synchronization
w.r.t any frame moving
perpendicular to the
A-B axis
⇒ in 12 hours all hypothe-
tical privileged frames
are scanned.

Ph. Eberhard, private communication

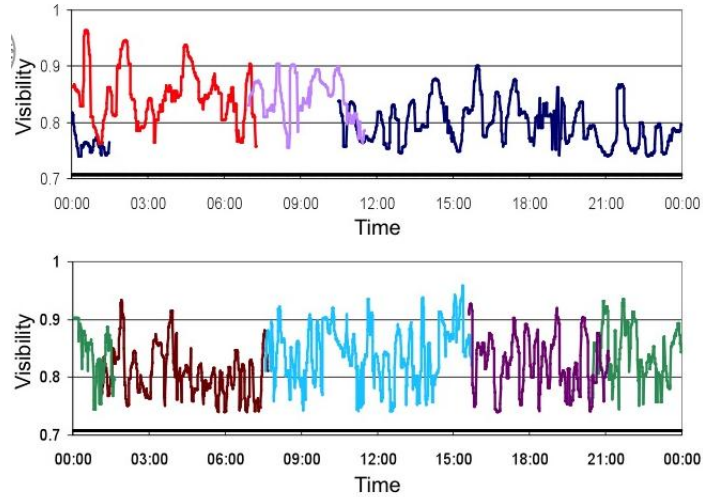
Le physicien suisse Philippe Eberhard a eu l’idée suivante : Alice et Bob étant orientés est/ouest (comme Satigny et Jussy) et les mesures étant bien synchronisées par rapport au référentiel d’inertie de la Terre (Genève), la synchronicité est alors également bonne par rapport à tous les référentiels qui se déplacent perpendiculairement par rapport à l’axe A-B. Donc pour tout ce qui se déplace dans ce plan vertical, la synchronicité sera la même que dans le référentiel de Genève.



Nature 454, 861, 2008

Mais dès lors que la Terre tourne, le plan vertical (qui passe par le pôle nord et le pôle sud) tourne également. En 12 heures, nous pouvons scanner tout l'espace, c'est-à-dire tous les repères privilégiés universels possibles.

Il reste donc à faire cette expérience et à violer les inégalités de Bell continûment durant 12 heures.



Nature 454, 861, 2008

La visibilité dépasse en permanence la limite de 71 %, qui est la limite inférieure pour violer les inégalités de Bell. L'échantillon ci-dessus montre que les inégalités de Bell ont été violées continûment durant 48 heures. Nous pouvons donc désormais mettre une borne inférieure sur cette vitesse supraluminique hypothétique.



Finite precision

▪ The «Speed of Quantum Information» V_{QI} is $V_{QI} \geq \frac{\|\vec{r}_B' - \vec{r}_A'\|}{|t_B' - t_A'|}$

▪ After a Lorentz transformation, one finds

$$\left(\frac{V_{QI}}{c}\right)^2 \geq 1 + \frac{(1-\beta^2)(1-\rho^2)}{(\rho + |\beta|)} \geq 1 + \frac{(1-\beta^2)(-\rho^2)}{(\rho + |\beta|)}$$

if $|\rho| = \bar{\rho}$

$\beta = v/c$ is the relative speed of the Earth frame in the privileged frame,

$\rho = ct_{AB}/r_{AB}$ defines the alignment of the 2 detections in the Earth frame

T = 360 seconds	$\bar{\delta} \approx 5.4 \cdot 10^{-6}$	$\alpha \approx 5.8^\circ$
------------------------	--	--

time T , during which $|\beta_{||}(t)|$ is upper-bounded by:



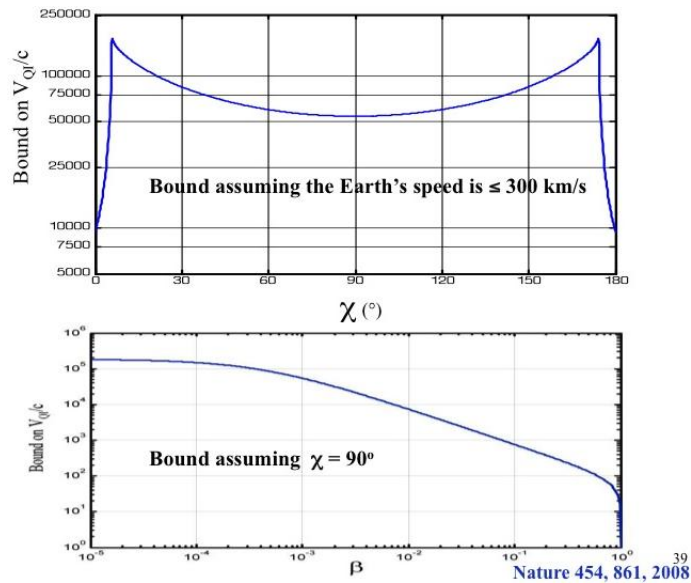
• $\tan \chi > \tan \alpha \Rightarrow |\beta_{||}(t)| \leq |\beta| \sqrt{\sin^2 \chi \cos^2 \alpha - \cos^2 \chi \sin^2 \alpha} \frac{\omega T}{2}$

• $\tan \chi < \tan \alpha \Rightarrow |\beta_{||}(t)| \leq |\beta| \left(|\cos \chi \sin \alpha| - |\sin \chi \cos \alpha| \cos \frac{\omega T}{2} \right)$

Nature 454, 861, 2008

Il faut environ 360 secondes pour faire une mesure de Bell complète – 6 minutes durant laquelle la Terre tourne déjà un petit peu. Par ailleurs, notre synchronisation était très bonne, mais pas parfaite (5 quarts par million). En outre, Satigny et Jussy ne sont pas exactement est/ouest, mais désalignés de 6 degrés. Nous avons tenu compte de tous ces éléments pour mesurer nos barres d'erreur. Nous avons également fait l'hypothèse que la vitesse à laquelle la Terre se déplacerait par rapport au repère universel privilégié devrait être inférieure à 300 kilomètres par seconde. A ce moment-là, la vitesse de cette influence devrait

être d'au moins 50 000 fois la vitesse de la lumière pour arriver à temps et expliquer les corrélations observées.



L'axe horizontal est celui du repère privilégié par rapport à l'axe de la Terre. Il passerait donc par le pôle nord, l'équateur et le pôle sud. Nous retrouvons les 6 degrés de désalignement de Savigny et Jussy. Dans le pire des cas, nous n'aurions « que » 10 000 fois la vitesse de la lumière.

Cette expérience repose sur une hypothèse tout à fait raisonnable, avec des prédictions claires et intuitivement faciles à comprendre. Certes, elle n'est pas simple à réaliser, mais les technologies actuelles la rendent possible. Nous pouvons ainsi mettre une borne expérimentale sur la vitesse des influences hypothétiques.

Bernard d'Espagnat. Cette expérience a-t-elle été faite ?

Nicolas Gisin. Oui. Ces résultats expérimentaux ont été publiés il y a quatre ans dans un article de *Nature*.

Hervé Zwirn. Vous testez expérimentalement une vitesse supraluminique hypothétique de l'influence à distance. Imaginons qu'une influence de cette nature se déplace effectivement à 50 000 fois la vitesse de la lumière. Considéreriez-vous que cette conclusion remet en cause la relativité restreinte ?

Nicolas Gisin. Non. Elle la complète. La question de la complétude de la théorie quantique est souvent posée. Il me semble que nous pourrions poser la même question concernant la relativité. En l'occurrence, cela signifierait que la relativité doit être complétée par l'existence d'un repère privilégié.

Hervé Zwirn. Imaginons qu'il y ait effectivement une influence du type que vous venez de décrire. Alice a fait sa mesure et une influence se propage pour Bob à 50 000 fois la vitesse de la lumière. Mais compte tenu du fait qu'Alice et Bob sont séparés par un intervalle du genre espace, il existe un référentiel dans lequel c'est Bob qui a fait la mesure en premier. Comment retrouvez-vous ce raisonnement, dans cette hypothèse ?

Nicolas Gisin. Cette vitesse supraluminique est définie dans ce repère privilégié. Donc non seulement il existe un repère privilégié, mais nous pouvons le déterminer expérimentalement. Et certains phénomènes très particuliers ne sont plus covariants.

Hervé Zwirn. D'accord. Vous aboutissez donc à la conclusion qu'il y a obligatoirement des choses non covariantes à la fin.

Nicolas Gisin. Oui. Pour autant, cela ne falsifie rien de ce que nous connaissons de la relativité. Cela la complète, dans le sens que cela ajoute à ce que l'on connaît déjà : l'existence du repère privilégié et l'existence de phénomènes bien particuliers (non-localité quantique) qui ne seraient plus covariants. Nous nous en serions rendu compte expérimentalement, en observant de façon périodique (toutes les 12 heures) la visibilité chuter en deçà de la borne de Bell.

Bernard d'Espagnat. D'après la première expérience que vous avez décrite, cela implique quand même une violation de la covariance de Lorentz, c'est-à-dire l'idée de base de la relativité d'Einstein.

Nicolas Gisin. En effet, ce n'est certainement pas du tout dans l'esprit de la relativité d'Einstein. Mais factuellement, tous les phénomènes qui ont été observés jusqu'à présent restent décrits de la même manière. Il y a « simplement » de nouveaux phénomènes ne sont pas covariants et ne respectent pas la covariance de Lorentz.

Ce type d'expérience présente des faiblesses, ou des limites. En effet, même si nous l'améliorons, avec de plus grandes distances et une meilleure synchronisation, nous ne pourrions qu'établir des bornes inférieures sur la vitesse, en arrivant peut-être à 500 000 fois la vitesse de la lumière au lieu de 50 000. Nous ne pourrions jamais aller vraiment plus loin. Tant qu'il n'y a que deux parties, l'influence est suffisamment rapide et reste cachée à nos yeux. Nous ne pouvons pas nous en servir pour communiquer. Elle pourrait n'être qu'un outil de coordination des particules quantiques inaccessible aux humains.

J'y reviendrai, mais je souhaite auparavant parler d'une autre idée, celle d'Antoine Suarez et de Valerio Scarani, selon laquelle le repère privilégié ne serait pas universel, mais choisi localement. Il est alors assez naturel d'imaginer que c'est l'appareil de mesure d'Alice et plus précisément le référentiel d'inertie de cet appareil de mesure qui détermine à quelle vitesse l'information quitte Alice pour aller vers Bob. Réciproquement, chez Bob, c'est son appareil de mesure et plus précisément son référentiel d'inertie qui détermine la vitesse l'information à laquelle l'information de Bob part vers Alice.

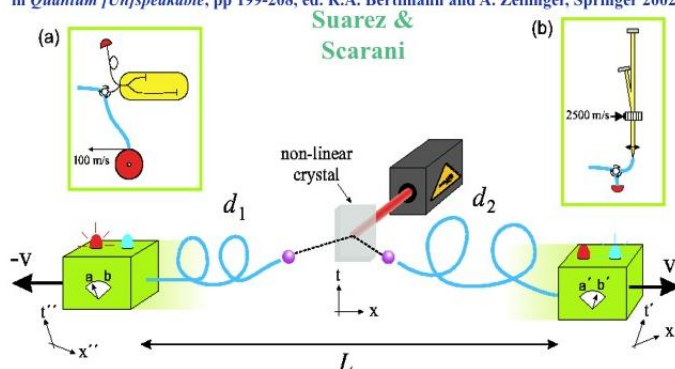
Il en découle l'idée suivante : si les deux *choice devices* (appareils de mesure ou composants dans lesquels les choix ont lieu) sont en mouvement relatif, et plus précisément s'ils s'éloignent l'un de l'autre, nous pouvons arranger les choses de telle sorte que dans le référentiel d'inertie (*choice device*) d'Alice, celle-ci soit la première à faire la mesure, mais que Bob soit également le premier à faire la mesure.

Si tous les deux sont les premiers à faire la mesure, aucun ne peut influencer l'autre à temps. C'est une belle idée, qui me semble intuitivement assez simple et qui peut être testée.

En l'occurrence, nous avons fait cette expérience, en nous mettant dans une configuration *before-before* (avant-avant, tous les deux étant avant l'autre). Ce modèle nous dit que les corrélations quantiques qui permettent de violer les inégalités de Bell devraient disparaître.

Further experiments: before-before configurations

NG, *Sundays in a quantum engineer's life*, quant-ph/0104140
in *Quantum [Un]speakable*, pp 199-208, ed. R.A. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer 2002



PRL 88,120404,2002; J.Phys.A 34,7103,2001; Phys.Lett.A 276,1,2000

L'expérience a eu lieu entre Bernet et Bellevue, distants de 10 kilomètres. Ainsi, même avec une vitesse relativement faible, il est possible de changer l'ordre temporel chez Alice et Bob. Nous avons donc installé une roue qui tourne très rapidement, de sorte que la tangente se déplace à 100 mètres par seconde. Le photon arrive et est absorbé ou non. S'il l'est, il n'y a pas de détection à la sortie de l'interféromètre de Michelson à deux voies. S'il ne l'est pas, il y a détection. Et comme il se déplace à 100 mètres par seconde, nous pouvons tester l'hypothèse de before-before, pour autant qu'il y ait une synchronicité suffisante entre Alice et Bob.

Nous l'avons testé, et trouvé que les inégalités de Bell étaient toujours violées. Antoine Suarez nous a alors indiqué que ce n'était pas juste, car il ne fallait pas mettre le détecteur en mouvement, mais le miroir semi-transparent (coupleur fibres optiques) car c'est le composant où a lieu le choix. Il a donc fallu mettre un miroir semi-transparent en mouvement. Pour y parvenir, nous avons utilisé une onde acoustique se propageant dans un cristal. La vitesse de propagation est assez rapide. Nous avons fait l'expérience avec le miroir se propageant, et nous avons de nouveau violé les inégalités de Bell. Les corrélations quantiques sont restées. Antoine Suarez a accepté ce résultat.

L'hypothèse before-before est très belle, mais elle est fausse. Nous en sommes donc toujours au même point !

Je reviens à l'idée que l'influence est définie dans un repère universel privilégié, par exemple celui dans lequel le fond cosmique micro-ondes est isotrope. Tant qu'il n'y a qu'Alice et Bob, nous ne pouvons pas faire grand-chose de plus. Par ailleurs, l'hypothétique influence pourrait rester cachée : même si elle existe, elle ne pourrait pas être utilisée par les humains pour communiquer. En effet, il continuerait à y avoir les corrélations quantiques, qui ne peuvent pas être utilisées pour transmettre de l'information. Ainsi, dans l'exemple ci-dessous, les statistiques du résultat de Bob sont complètement indépendantes du choix de mesure d'Alice. Bob conserve ses statistiques localement et n'apprend rien sur ce qu'a fait Alice, et réciproquement.

Assume a real influence propagating faster than light but with finite speed

$$p(a,b|x,y,\lambda) = p(a|x,\lambda) \cdot p(b|y,\lambda)$$



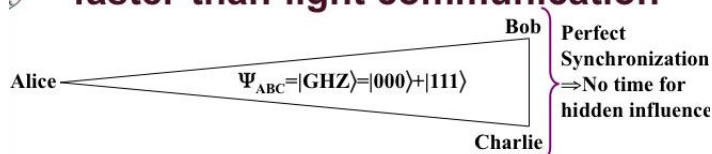
Faster than light influences defined in a universal privileged frame, e.g. the one in which the cosmic background microwave radiation is isotropic

With only two parties, the hidden influence could remain hidden for ever.

4

La question est donc la suivante : une réelle influence pourrait-elle rester cachée pour toujours ? Ou, au contraire, permettrait-elle nécessairement de communiquer plus rapidement que la lumière ? Il est impossible d'y répondre avec deux parties seulement. Ajoutons donc une troisième partie, Charlie.

Hidden influences alone would allow faster-than-light communication



If Alice doesn't measure, then Bob & Charlie's outcomes are independent.

If Alice first measures σ_z and Bob & Charlie later also measure σ_z , then Bob & Charlie's outcomes are always the same.

V. Scarani, W. Tittel, H. Zbinden and N. Gisin, Phys.Lett. A 276, 1-7 (2000).
 V. Scarani & NG, Brazilian J. of Physics 35, 328-332 (2005), quant-ph/0410025
 L.C. Ryff, arXiv:0903.1076
 Ph. Eberhard, in "Q theory and pictures of reality", Ed W. Schommers, Springer-Verlag, Heidelberg, pp 169-215, 1989.

45

Supposons que Bob et Charlie se situent à un kilomètre l'un de l'autre. Ils sont donc relativement proches, mais suffisamment distants pour que nous puissions les synchroniser de telle sorte que l'influence n'ait pas le temps d'aller ni de Bob à Charlie, ni de Charlie à Bob. Ils sont donc indépendants. Alice, pour sa part, est très éloignée, à une année lumière. Nous leur donnons un état dit GHZ, qui est une superposition de 0/0/0+1/1/1 en termes de qubit ou de up/up/up+down/down/down en termes de spin.

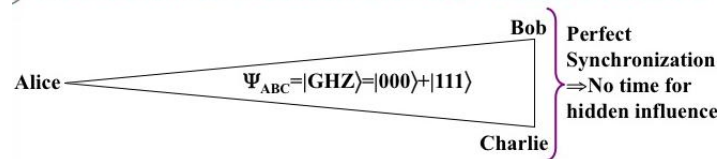
Si Alice ne fait pas de mesure, Bob et Charlie étant indépendants, ils obtiennent chacun un résultat aléatoire. Ils peuvent obtenir n'importe quelle combinaison de résultats (up/up, up/down, down/up, down/down).

En revanche, si Alice fait d'abord une mesure (σ_z , up ou down), elle obtient un résultat aléatoire. Immédiatement, une influence supraluminique va d'Alice vers Bob et d'Alice vers Charlie. Bob et Charlie savent donc qu'ils doivent obtenir le même résultat pour reproduire les corrélations quantiques. Etant fortement corrélés et dans la mesure où ils sont distants d'un

kilomètre, il leur faut environ une microseconde pour comparer leurs résultats. S'ils obtiennent toujours le même résultat, ils savent qu'Alice a fait sa mesure – et ils le savent même si Alice est très éloignée, pour autant que l'influence supraluminique leur soit parvenue. Il y a donc communication d'Alice vers la paire Bob-Charlie quasiment à la vitesse de cette influence qui n'est plus cachée, puisqu'elle peut être utilisée.

Si nous pensons relativité, nous considérons que ce n'est pas possible, puisque la relativité nous dit que les êtres humains ne peuvent pas communiquer plus vite que la lumière. Mais une objection vient alors à l'esprit : il se pourrait que lorsque Bob et Charlie ne reçoivent aucune influence d'Alice, ils répondent en fonction de variables locales plutôt qu'au hasard.

**Hidden influences would allow signalling,
i.e. communication without transmission**

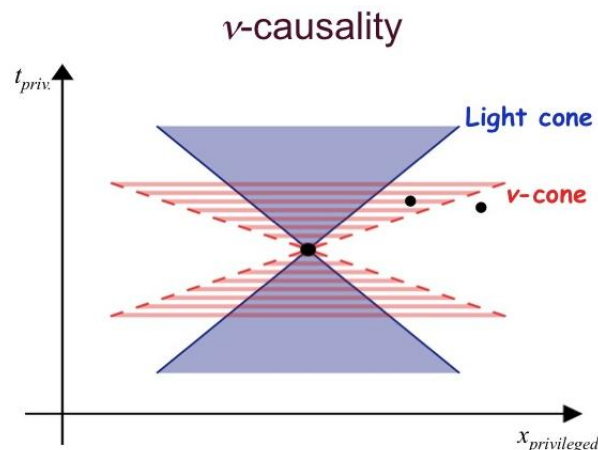


An immediate objection is that whenever the hidden influence doesn't arrive on time, the outcome could be determined by local hidden variables.

This corresponds to an explanation combining local hidden variables and finite-speed influences.

Nous pourrions donc combiner des variables locales et des influences supraluminiques. Ce serait vraiment le modèle mécanique, local, le plus général.

Pour l'analyser, il faut introduire le modèle de v -causalité, v étant la vitesse de l'influence hypothétique supra luminique.

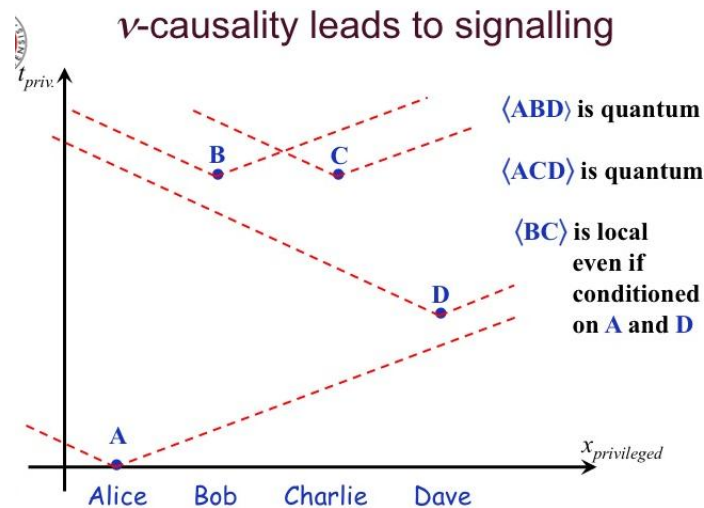


V est définie dans un repère privilégié. Chaque fois qu'un événement a lieu si Alice fait un choix par exemple, le reste de l'Univers en est informé. Quand l'influence arrive à temps pour corrélérer des événements, nous retrouvons les prédictions de la mécanique quantique. En revanche, quand elle n'arrive pas à temps, les événements doivent être locaux au sens de Bell : ils ne peuvent plus être corrélés que par des variables locales, et ne peuvent donc plus violer l'inégalité de Bell.

Il apparaît donc que ce type de modèle ne pourra jamais reproduire complètement la physique quantique. En effet, deux événements parfaitement synchronisés ne peuvent pas violer des inégalités de Bell. A cet égard, c'est un modèle de celui de Bohm, qui serait celui de la v -causalité avec v étant égal à l'infini : l'effet d'un côté a une conséquence immédiate de l'autre côté.

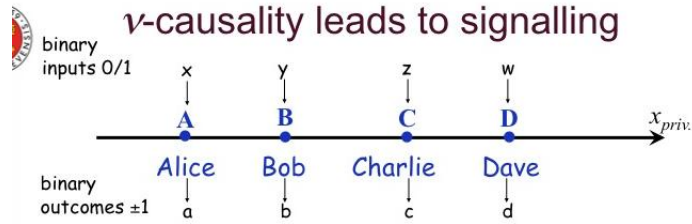
Avec ces hypothèses, il est possible de prouver que l'influence ne peut pas rester cachée. La v -causalité est dans un repère privilégié, avec un espace privilégié et un temps privilégié. En plus du cône de lumière, il y a un autre cône, à la vitesse v , plus grande que la lumière. Il est donc plus ouvert. Deux événements sont connectés par des influences à la vitesse v – ils peuvent donc violer l'inégalité de Bell, tout en restant locaux dans le sens des influents supraluminiques –, tandis que deux autres ne le sont pas.

Nous avons essayé de l'analyser dans un scénario avec quatre parties : Alice, Bob, Charlie et Dave.



Alice (A) fait sa mesure en premier. Dave reçoit l'influence supraluminique à temps. Alice et Dave (D) peuvent donc être corrélés comme des événements le seraient d'après la théorie quantique. Alice, Dave et Bob (B) peuvent également l'être, de même qu'Alice, Dave et Charlie (C). En revanche, Bob-Charlie doit être local, car cette paire doit toujours être parfaitement synchronisée. Il ne peut pas y avoir de violation des inégalités de Bell entre eux – même si nous conditionnons leur corrélation au résultat d'Alice et Dave. Vous pouvez penser que cela ne nous apprend rien, dans la mesure où une paire doit toujours être parfaitement synchronisée.

Cela étant, un théorème récent, qui sera publié très prochainement, indique dans l'esprit de Bell, que s'il existe une corrélation à quatre parties *no signalling* (c'est-à-dire qu'elle ne permet pas de communication supraluminique) et que si Bob-Charlie est local, alors une certaine inégalité doit être satisfaite : J inférieur ou égal à 7.



Theorem: If $p(a,b,c,d|x,y,z,w)$ is non-signalling
 and $p(b,c|y,z, a,x,d,w)$ is local for all a,x,d,w ,
 then
 $J \leq 7$

Where $J = -3\langle A_1 \rangle - \langle B_0 \rangle - \langle B_1 \rangle - \langle C_0 \rangle - 3\langle D_0 \rangle - \langle A_1 B_0 \rangle - \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_0 C_0 \rangle$
 $+ 2\langle A_1 C_0 \rangle + \langle A_0 D_0 \rangle + \langle B_0 D_1 \rangle - \langle B_1 D_1 \rangle - \langle C_0 D_0 \rangle - 2\langle C_1 D_1 \rangle$
 $+ \langle A_0 B_0 D_0 \rangle + \langle A_0 B_0 D_1 \rangle + \langle A_0 B_1 D_0 \rangle - \langle A_0 B_1 D_1 \rangle - \langle A_1 B_0 D_0 \rangle$
 $- \langle A_1 B_1 D_0 \rangle + \langle A_0 C_0 D_0 \rangle + 2\langle A_1 C_0 D_0 \rangle + 2\langle A_0 C_1 D_1 \rangle$

J contient des termes avec uniquement A, B, C ou D, des termes avec A-B (quantique), avec B-C (quantique), A-B-D (quantique), A-C-D (quantique). En revanche, aucun des termes de J ne contient B-C. Cela signifie que tout modèle v-causalité prédit pour cette inégalité la même valeur que la mécanique quantique. Cela signifie aussi que nous pouvons faire une expérience sans avoir besoin de synchroniser B et C. Il suffit de mesurer les marginales A-D-B ou A- D-C pour déduire quelque chose sur B-C.

Ce n'est pas le premier exemple dans lequel, dans la théorie des probabilités, connaître les marginales permet de déduire quelque chose sur la probabilité complète. Mais je crois que c'est la première fois où la mesure des marginales permet de déduire que B-C est non-local, et viole donc l'inégalité de Bell. C'est tout à fait nouveau, et permet d'éviter d'avoir à parfaitement synchroniser B et C.

$J = -3\langle A_0 \rangle - \langle B_0 \rangle - \langle B_1 \rangle - \langle C_0 \rangle - 3\langle D_0 \rangle - \langle A_1 B_0 \rangle - \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_0 C_0 \rangle$
 $+ 2\langle A_1 C_0 \rangle + \langle A_0 D_0 \rangle + \langle B_0 D_1 \rangle - \langle B_1 D_1 \rangle - \langle C_0 D_0 \rangle - 2\langle C_1 D_1 \rangle$
 $+ \langle A_0 B_0 D_0 \rangle + \langle A_0 B_0 D_1 \rangle + \langle A_0 B_1 D_0 \rangle - \langle A_0 B_1 D_1 \rangle - \langle A_1 B_0 D_0 \rangle$
 $- \langle A_1 B_1 D_0 \rangle + \langle A_0 C_0 D_0 \rangle + 2\langle A_1 C_0 D_0 \rangle + 2\langle A_0 C_1 D_1 \rangle$

Any v-causal model predicts the same value for J as QM

v-causal predictions differ from Q theory, but since J doesn't contain any term involving B and C, the v-causal prediction for J is merely the Q value.

Moreover, in an experiment B and C do not need to be measured in the same run. \Rightarrow No B-C timing issue!

De la même façon que l'inégalité de Bell serait complètement triviale et inintéressante s'il n'y avait pas la possibilité de la violer, il existe ici des états quantiques et des mesures qui prédisent une violation. L'expérience n'a pas encore été faite, mais nous nous attendons à une violation. Cela signifierait qu'une des hypothèses n'est pas satisfaite : soit B-C ne serait pas local – mais c'est impossible (dans le cadre de la v-causalité), soit le *no signalling* est faux, et nous pouvons donc communiquer de façon non-physique.

v -causality leads to signalling

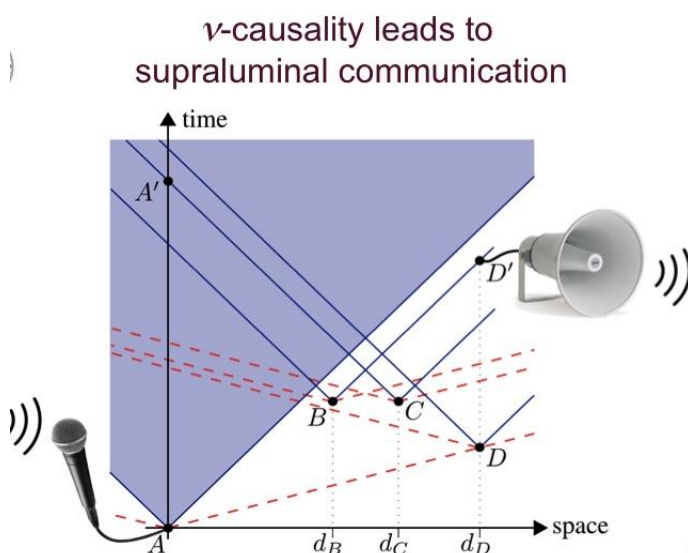
Fact: there are quantum states and measurements predicting $J > c$

Theorem: If $p(a,b,c,d|x,y,z,w)$ is non-signalling
and $p(b,c|y,z, a,x,d,w)$ is local for all a,x,d,w
then
 $J \leq c$

Consequence: Since any v -causal model predicts that
 $p(b,c|y,z, a,x,d,w)$ is local,
 $p(a,b,c,d|x,y,z,w)$ must be signalling.

arXiv:1110.3795, Nature Physics, in press

Nous pouvons même montrer explicitement que cette communication permettrait d'aller plus vite que la lumière.



4. Conclusions

S'il y a une violation, il n'y a plus que deux possibilités. Soit nous avons vraiment éliminé la possibilité d'avoir une influence supraluminique, même à un milliard de fois la vitesse de la lumière : n'importe quelle influence doit aller à une vitesse infinie. Il y a alors vraiment de la non-localité pure. Les événements distants sont simplement connectés d'une certaine façon. Nous avons donc éliminé les variables locales, de même que l'idée d'une influence à vitesse supraluminique mais finie, définie dans un repère universel privilégié, est impossible. Soit nous pouvons nous dire qu'il est possible de communiquer plus vite que la lumière, ce qui met à mal la relativité.

Je ne pense pas que beaucoup de physiciens me suivront dans cette voie, mais je continue à penser qu'elle est intéressante et que la quête d'une explication mécanique mérite d'être poursuivie. Je précise que je parle d'une vitesse plus rapide que la lumière mais définie dans un seul référentiel privilégié, ce qui empêche le paradoxe du « grand-père assassiné par son petit-fils ».

L'alternative de la non-localité pure et de la fausseté de la relativité est difficile à accepter. J'aimerais progresser dans la résolution de ce dilemme.

Si nous voulons supposer que la non-localité est falsifiée, il faut améliorer l'expérience.

Enfin, si nous retenons la conclusion la plus politiquement correcte (il n'y a aucune communication supraluminale), il faut alors affirmer qu'Einstein s'est trompé avec son idée d'action fantôme. Il est faux de dire qu'un événement influence un autre. Les corrélations quantiques ont simplement lieu, sans aucun ordre temporel. Elles surgissent en quelque sorte de l'extérieur de l'espace-temps. En effet, nous ne pouvons pas raconter une histoire qui se déroulerait dans l'espace-temps et qui décrirait comment les corrélations surviennent. Est-ce suffisant ? Les scientifiques, en particulier les physiciens, abandonneront-ils la grande entreprise qui consiste à expliquer la nature, c'est-à-dire à raconter des histoires ? Pour moi, tout bon cours de physique ne commence pas par une équation, mais par une histoire. Sinon, nous n'aurions toujours pas compris ce qu'est l'énergie ou la masse.

Puisque nous ne pouvons pas raconter d'histoire dans l'espace-temps mais que nous voulons continuer à expliquer, il faut accepter d'élargir notre boîte à outils pour raconter des corrélations non-locales. Nous pourrions alors raconter qu'un événement aléatoire peut se manifester à plusieurs endroits, par exemple. Cette histoire ne se raconte pas dans l'espace-temps, mais est assez proche du formalisme de la physique quantique.

Je vous remercie de votre attention.

Section II – Discussion

Roger Balian. Comment faire l'expérience à quatre parties, qui impose une distance considérable ?

Nicolas Gisin. C'est une bonne question ! Ce n'est pas si simple, effectivement. Une manière de situer Dave au bon endroit consiste à le placer dans le futur d'Alice, de même que Bob et Charlie seront dans le futur de Dave. Et comme nous ne devons jamais mesurer Dave et Charlie en même temps, il suffit d'avoir A, D et B ou A, D et C dans le futur l'un de l'autre. Du point de vue de la configuration dans l'espace-temps, cette expérience est assez simple. En revanche, ce qui est compliqué, c'est le grand nombre de termes à mesurer. Il faut aussi une très bonne visibilité, et quatre particules.

Les distances peuvent même être petites, sous réserve que le temps d'une mesure soit plus court que la distance entre Bob et Charlie – ce qui n'est pas difficile à obtenir. Une dizaine de mètres suffit, en supposant qu'il n'est pas besoin de déplacer une masse pour effectuer la mesure, que c'est le premier micron la diode à avalanche qui déclenche l'avalanche et que la mesure est terminée à partir de ce moment-là (le résultat est déjà là et il suffit de l'amplifier pour pouvoir le voir).

Michel Le Bellac. Il y a une petite pique sur les physiciens des particules, dans votre ouvrage.

François David. Quelle est-elle ?

Michel Le Bellac. Elle dit que les physiciens des particules sont indifférents à ce type de problème.

Nicolas Gisin. Il reste une communauté de physiciens à convaincre de l'importance des travaux sur la non-localité ou la non-séparabilité. Il y a 20 ans, par exemple, la physique du solide ignorait superbement la non-localité. Aujourd'hui, leur rêve serait d'arriver à

intriquer des morceaux de métal ou des électrons dans les métaux. Et vous trouvez l'inégalité de Bell dans chaque numéro de *Physical Review*. Il y a 20 ans, vous ne trouviez jamais référence à l'inégalité de Bell dans *Physical Review Letters*. En revanche, les physiciens des hautes énergies y sont encore allergiques !

Michel Le Bellac. Je vais précisément parler d'intrication et de physique des hautes énergies. La première expérience qui a vraiment montré la non-invariance par renversement du sens du temps utilise la désintégration des mésons B . Ceux-ci sont produits par paires par désintégration d'un Upsilon dans un état $4S$. Quand un des deux mésons de la paire se désintègre, par exemple en émettant un lepton négatif, son partenaire de la paire devient instantanément un B_0 barre. A partir du point de désintégration on peut reconstituer les oscillations B_0 - B_0 barre de l'autre particule. Ma question est donc la suivante: n'est-ce pas là un exemple de la fameuse *spooky action at a distance* d'Einstein ?

Apparemment, les physiciens qui conduisent cette très jolie expérience font l'hypothèse que le moment où ils commencent l'analyse pour la seconde particule est celui de la désintégration de la première, ce qui est un processus microscopique et pas du tout un processus de mesure dans lequel il faudrait attendre que le lepton négatif ait activé un compteur et ait été dûment enregistré, selon la prescription de Wheeler. La désintégration est décrite par une évolution de type Schrödinger (relativiste) et n'a rien à voir avec une réduction de paquet d'ondes.

Nicolas Gisin. La grande différence avec les expériences d'optique, ou avec des ions et des atomes, est qu'il n'y a pas vraiment de choix dans la désintégration des mésons ou des kaons. Le physicien ne choisit pas de mesurer la polarisation horizontale ou verticale. C'est la nature qui décide. Or du moment que c'est la nature qui choisit la mesure, ce qui revient à violer la deuxième hypothèse que j'ai mentionnée, il n'y a pas du tout d'indépendance entre les choix de mesure et les variables supplémentaires. Nous pourrions imaginer que c'est la variable supplémentaire qui décide de la mesure. C'est une belle expérience de physique, mais ce n'est pas vraiment un test d'inégalité de Bell bien propre, dans le sens où aucun choix ne vient de l'extérieur.

Michel Le Bellac. Donc à votre avis, il est correct de prendre comme instant celui de la désintégration des particules mésons ?

Nicolas Gisin. C'est probablement ce que je ferais, mais je ne suis pas certain que ce soit une bonne illustration de la non-localité. Dans la non-localité, il faut vraiment une probabilité conditionnelle de résultat étant données les mesures. Ces dernières ne doivent pas être décidées par la particule elle-même.

Michel Le Bellac. C'est quand même un bel exemple d'intrication.

Nicolas Gisin. Oui. Je suis sûr qu'il y a de l'intrication. Il n'y a pas de doute.

Alexei Grinbaum. Je voudrais revenir à la question du temps. Un papier de Caslav Brukner, Paolo Perinotti et *al.* montre dans quels cas il est possible ou pas de lire l'ordre temporel des corrélations. La question générale est celle du lien avec le dernier résultat. Ce papier est exclusivement dédié au cas, bipartite, de corrélation entre seulement deux particules. Dans ce cas la borne de Tsirelson émerge en tant que critère de possibilité d'une

description dotée d'un ordre temporel. Votre résultat suggère-t-il que, dans le cas quadripartite, la frontière pour les corrélations que l'on peut décrire avec un ordre causal bien défini est également la borne quantique ?

Nicolas Gisin. C'est un résultat très récent, qui reste un sujet de recherche. Je ne sais pas vous répondre, mais il est vrai qu'il suggère fortement qu'il faut aller au-delà de deux parties. De nouvelles choses surgissent quand il y a trois ou quatre parties. Les choses changent y compris qualitativement.

Alexei Grinbaum. Un de mes étudiants a essayé de généraliser le résultat de Brukner mais il s'est aperçu que, dans le cas général, la borne de Tsirelson permet d'obtenir des contraintes plus modestes que cela n'est nécessaire. Il montre qu'on obtient alors trop peu de choses pour le cas général. Qu'en pensez-vous ? Cette idée selon laquelle l'ordre des événements serait lié au respect d'une borne par les corrélations est-elle fondamentale ?

Nicolas Gisin. Je n'ai pas vraiment de réponse, la recherche étant en cours. Mon opinion est que c'est très intéressant. Mais il est trop tôt pour apporter une réponse satisfaisante. Quand on dit qu'un événement peut se manifester à plusieurs endroits à la fois, il faut analyser le type de causalité. Cela change vraiment le concept de causalité, puisqu'il n'y a pas de premier et de deuxième. Cela change tout. Je pense que nous sommes encore loin de comprendre. Et nous ignorons si cela sera véritablement compatible avec la relativité.

Bernard d'Espagnat. Vous avez parlé d'expériences et de possibilités théoriques. En fait de théories fondamentales nous avons essentiellement la mécanique quantique et la relativité et, comme vous le disiez, se pose un problème de conciliation entre les deux. Or dans un récent article (*On the impossibility of covariant, nonlocal « hidden » variables in quantum physics*, Phys. Rev. A **83**, 020102, Feb. 2011) vous avez fourni une preuve simple, et à mon avis convaincante, de ce qu'une théorie déterministe et non locale visant à reproduire les prédictions expérimentales de la mécanique quantique – tel le modèle de Louis de Broglie et de David Bohm – ne peut pas être covariante. Et j'ai également lu dans votre article que vous suggériez que nous pourrions sortir de cette situation en renonçant au déterminisme. D'où ma question : pouvons-nous espérer parvenir à une synthèse de la relativité et de la mécanique quantique en introduisant des paramètres supplémentaires dans la mécanique quantique et en renonçant au déterminisme en relativité. Cela permettrait d'avoir un formalisme unifié.

Nicolas Gisin. A mon avis, la réponse est négative. Fondamentalement, la relativité est déterministe. Cela fait partie de son essence. La mécanique quantique, au contraire, a besoin d'aléatoire pour permettre la non-localité sans possibilité de communication. Ces deux théories sont fondamentales pour la physique d'aujourd'hui, mais sont incompatibles à la racine. Et pourtant, elles parviennent à coexister sans entrer en conflit direct. Nous n'avons aucun modèle de mesure pour vraiment les unifier, ce qui nécessiterait de faire une théorie quantique des champs avec une théorie de la mesure. En théorie quantique non relativiste il y a une théorie de la mesure. Certes, elle n'est pas belle et elle est *ad hoc*. Mais en mécanique quantique relativiste il n'y a aucun modèle de mesure. C'est d'ailleurs étonnant, pour une théorie physique, dans la mesure où la physique est une science expérimentale. Comment une théorie expérimentale peut-elle n'inclure aucun modèle de mesure ?

Bernard d'Espagnat. Oui mais je me demande si cette espèce d'incompatibilité qui vous est manifeste ne serait pas due en partie à ce que vous avez l'idée du réalisme derrière la

tête ? C'est ce que vous nous avez suggéré, en somme, en indiquant qu'il ne suffisait pas de calculer mais qu'il fallait aussi raconter une histoire sur la nature. Cette idée est fortement ancrée dans l'esprit de nous autres, physiciens. Mais si vous vous tournez vers les philosophes vous trouverez très vite qu'ils se sont aperçu depuis longtemps qu'il n'est pas du tout évident que la nature soit descriptible telle qu'elle est. Schrödinger était d'ailleurs de cet avis-là. La solution n'est-elle pas inscrite dans l'idée de coexistence pacifique, c'est-à-dire du renoncement au réalisme fort ? La théorie quantique des champs n'est-elle pas la réponse ? En effet, la théorie quantique des champs est à base de théorie quantique, et elle est relativiste. Et nous en avons absolument besoin parce que des phénomènes expérimentaux de création et d'annihilation existent.

Ne pouvons-nous pas sauter le pas et renoncer au réalisme pour aboutir à quelque chose de cohérent ?

Nicolas Gisin. Il me semble que l'absence de modèle de mesure en théorie quantique relativiste ne peut pas simplement être mise sur le dos d'un non-réalisme microscopique. Une mesure est faite à notre échelle. Nous choisissons d'orienter notre appareil selon tel angle, nous constatons que tel détecteur a réagi et pas tel autre, etc. Pour autant que nous allions au moins à ce niveau de réalisme, à notre échelle, il faut être capable de le décrire dans nos théories physiques. Il nous faut donc un modèle de mesure.

Bernard d'Espagnat. Oui, mais nous ne sommes pas obligés de supposer que les résultats de nos mesures correspondent à la réalité en soi. Nous ne pouvons pas réfuter l'idéalisme. C'est bien connu en philosophie. L'idéalisme est irréfutable. N'y a-t-il pas là une porte de sortie possible ? Selon cette théorie, les objets ne sont pas des réalités en soi, mais des phénomènes, des construits mentaux. Kant ne disait pas autre chose.

Roger Balian. A ce sujet, que pensez-vous d'un des textes de Poincaré selon lequel on ne peut pas concevoir que les physiciens aient un autre langage pour parler entre eux que les mathématiques.

Jean Petitot. Cela remonte à Galilée.

Roger Balian. Or les mathématiques ne sont pas une histoire que l'on raconte.

Nicolas Gisin. Il nous faut plus que les mathématiques, effectivement.

Jean Petitot. Oui, mais pourquoi ?

Nicolas Gisin. Peut-être parce que je suis un réaliste naïf ? En tout cas, je pense que le réalisme naïf a fait faire énormément de progrès à la science. Et je ne pense pas que nous soyons au bout.

Jean Petitot. Pourquoi estimez-vous que les belles histoires sont nécessairement spatio-temporelles ?

Nicolas Gisin. Je me suis sans doute mal exprimé, car je pense précisément le contraire !

Jean Petitot. Dans l'histoire de la métaphysique il y a eu des siècles de métaphysique non spatio-temporelle. La monadologie leibnizienne est une très jolie histoire qui, par définition, est non spatio-temporelle.

Nicolas Gisin. Je pense que nous sommes arrivés au point où nous ne pouvons plus raconter uniquement des histoires qui se déroulent dans l'espace-temps. Cela signifie qu'il faut élargir notre boîte à outils, avec des histoires qui sortent de l'espace-temps.

Jean Petitot. Pourquoi ne faites-vous pas l'hypothèse qu'il peut y avoir de très jolies histoires dans des espaces de Hilbert ?

Nicolas Gisin. Il est difficile de commencer un cours de physique par un espace de Hilbert. L'histoire ne commence pas là. L'espace de Hilbert est plutôt à la conclusion, à la fin du cours – ou durant le cours.

Jean Petitot. Pourquoi ?

Nicolas Gisin. Parce qu'aucun étudiant ne vous suivra !

Jean Petitot. Feynman a fait des cours de physique en commençant par l'espace de Hilbert.

Nicolas Gisin. Il a commencé par les expériences.

Jean Petitot. En allant tout droit à l'espace de Hilbert.

François David. Dire qu'il faut terminer un cours de mécanique quantique par l'espace de Hilbert revient à dire qu'on ne peut pas faire un cours de mécanique classique en commençant par l'espace de phase. C'est quand même la base, à un moment ou un autre. c'est la même chose pour l'espace de Hilbert.

Nicolas Gisin. Il faut que l'espace de Hilbert arrive durant le cours. Je pense la même chose pour l'espace de phase. Il faut quand même expliquer la masse avant d'entrer dans un espace de phase. Sinon, cela ne veut rien dire. Il faut déjà pouvoir construire sur ce concept de masse – et même un autre concept, qui nous semble totalement évident au XXI^{ème} siècle : celui de vitesse, intimement associé à celui de dérivée. Il faut parler de vitesse et de masse avant de parler d'espace de phase.

Si vous pouvez commencer votre cours par l'espace de phase, c'est que quelqu'un d'autre a fait les cours précédents !

Roger Balian. Nous parlons de vitesse parce qu'il y a eu quelques physiciens avant nous. Mais nous pouvons commencer à le faire d'emblée.

Nicolas Gisin. Le concept de vitesse est encore assez intuitif pour beaucoup de monde. Celui de masse, pas tellement.

Hervé Zwirn. Ça, c'est de la pédagogie. Une présentation pédagogique des choses implique peut-être un ordre qui n'est pas celui que nous avons en tête une fois que nous sommes arrivés au bout. Mais la pédagogie ne peut nous donner qu'une indication très faible sur ce que sont ou devraient être les choses ultimement. Même si la conclusion des recherches

aboutit à des choses qui sont extrêmement difficiles à présenter, ce n'est pas pour autant que ces choses ne sont pas telles qu'elles sont.

Nicolas Gisin. Il faudrait que je réfléchisse davantage à cet aspect. Dans mon esprit, il y a un lien plus profond que vous ne le suggérez entre la pédagogie et la réalité des choses. Ce que je veux éviter, c'est qu'à la fin on considère qu'on peut se contenter de l'espace de Hilbert. Comprendre n'est pas simplement faire appel à une artillerie mathématique. Sinon, un ordinateur comprendrait. Or il ne comprend pas. La différence est la capacité à donner du sens, ce qui implique de raconter des histoires.

Jean Petitot. Vous n'êtes donc pas galiléen.

Nicolas Gisin. Je crois pourtant que Galilée racontait beaucoup d'histoires !

Jean Petitot. Mais en langage mathématique.

Nicolas Gisin. Ce langage est nécessaire, cela ne fait aucun doute. Mais, dans mon esprit, il n'est pas suffisant.

Bernard d'Espagnat. Nous devons quand même reconnaître que la science elle-même nous a forcés à beaucoup affiner nos concepts, et quelque fois même à abandonner ceux qui nous paraissaient évidents. La physique quantique essaie de nous dire qu'il faut en abandonner encore un peu plus. Il faut évidemment commencer par raconter des histoires pour expliquer la nature, pour les raisons pédagogiques que nous venons de dire. Mais cela ne nous dit pas que les concepts que nous utilisons pour raconter les histoires sont les bons. Peut-être faut-il aller encore beaucoup plus loin et nous dire qu'il n'y a presque aucun de nos concepts qui soit vraiment applicables à la réalité telle qu'elle est. C'est bien possible. Et dans ces conditions, ou bien nous inventons de nouveaux concepts, ou bien nous renonçons à cette idée d'une réalité en soi descriptible et nous faisons « du Kant » : les objets correspondent à des phénomènes, mais pas à l'ultime réalité.

Nicolas Gisin. Je suis tout à fait d'accord avec vous quant au fait qu'il existe des concepts qui nous paraissent totalement intuitifs et qu'il faut abandonner. C'est le cas avec celui de localité par exemple. De la même façon, il faut élargir notre boîte à outils, c'est-à-dire les concepts que nous utilisons pour raconter des histoires. Ne serait-ce que parce que les concepts intuitifs ne suffisent pas pour parler de non-localité.

Bernard d'Espagnat. Ne faut-il pas élaguer également ?

Nicolas Gisin. J'élague la localité, par exemple.

Bernard d'Espagnat. Peut-être faut-il élaguer encore plus ?

François David. Le livre de référence sur la mathématique de la théorie quantique des champs s'intitule *Local Quantum Physics*.

Alexei Grinbaum. Ce n'est pas « local » dans le sens de l'espace-temps.

Nicolas Gisin. C'est dans le sens de *no signalling*.

François David. Pour Haag en tout cas, la localité est au cœur de la théorie quantique des champs, donc de la compatibilité entre la physique quantique et la relativité.

Alexei Grinbaum. Ce n'est pas la même localité.

Nicolas Gisin. En effet, c'est le même mot pour dire autre chose. Lorsque Haag parle de localité, il ne parle pas du tout de la même chose que Bell.

François David. Je pense que c'est le bon concept de localité à garder.

Nicolas Gisin. Je le garde aussi en parlant d'hypothèse de *no signalling*, pour la différencier de la localité de Bell. Je ne veux pas utiliser le même mot pour parler de deux choses différentes.

François David. Quand ils pensent localité, les physiciens des hautes énergies pensent localité au sens de Haag.

Nicolas Gisin. Bien sûr. C'est de la terminologie. Pour autant, changer un mot par un autre ne change pas les concepts.

François David. Mais pour raconter des histoires, il faut un vocabulaire commun.

Jean-Pierre Gazeau. Quand vous parlez d'absence de théorie de la mesure compatible avec la physique relativiste, parlez-vous essentiellement de l'impossibilité d'extraire un véritable opérateur avec une mesure spectrale dans un cadre complètement covariant relativiste ?

Nicolas Gisin. Non, c'est plus compliqué que cela. C'est l'idée qu'une personne ou une chose peut faire un choix, qui se traduit ensuite par des paramètres de mesure. La physique non-relativiste dirait qu'il a une réduction de la fonction d'onde et production de résultats. Ce genre de description du processus de mesure n'existe pas en mécanique quantique relativiste.

Roger Balian. Pourquoi ?

Michel Le Bellac. Je ne suis pas tellement d'accord avec ce point de vue. En théorie quantique des champs, l'évolution de Schrödinger est parfaitement covariante et compatible avec l'invariance de Lorentz. Si je dois décrire une collision ultra-relativiste de particules avec production de particules secondaires, je calcule les probabilités par la théorie quantique des champs. Le processus de mesure consiste à mettre des compteurs bien positionnés. Je n'ai pas besoin de réduction du paquet d'onde, mais simplement de la règle de Born.

Nicolas Gisin. Parce que vous ne voulez pas faire des mesures de corrélations.

Alexei Grinbaum. Vous ne mesurez pas un opérateur auto-adjoint. Vous mesurez autre chose.

Michel Le Bellac. C'est comme dans Bell. Je peux raisonner avec réduction du paquet d'onde, mais je peux aussi dire que mon processus de mesure est non local, avec des

compteurs qui sont localisés dans des régions de l'espace-temps différentes. Je peux utiliser uniquement la règle de Born et me passer complètement de la réduction du paquet d'onde.

Nicolas Gisin. D'un point de vue pratique, vous le pouvez. Mais vous ne pourrez pas décrire l'état du système après une mesure individuelle. Vous ne pourrez faire que des statistiques.

Michel Le Bellac. L'état du système n'existe que dans ma tête, pas en réalité. C'est ce que dit Asher Peres.

Nicolas Gisin. Il existe dans mon laboratoire !

Michel Le Bellac. Asher Peres dit que le vecteur d'état existe dans la tête du physicien, pas dans le laboratoire.

Nicolas Gisin. Je pense en tout cas que les photons qui circulent dans mes fibres optiques sont dans un état objectif.

Michel Le Bellac. Pas nécessairement. Je le crois aussi, car je suis fondamentalement réaliste, mais je n'y suis pas obligé.

Nicolas Gisin. Et je ne suis pas obligé de ne pas le croire !

Bernard d'Espagnat. Je pense qu'il y a contre le réalisme des arguments sérieux. Nous avons étudié la théorie de la décohérence, l'année dernière. Nous sommes plusieurs à considérer que la décohérence nous explique pourquoi nous avons l'impression de voir telle et telle chose, mais qu'elle ne nous dit pas que les choses (l'appareil de mesure et l'objet mesuré) sont réellement dans tel ou tel état après la mesure. Nous sommes donc obligés, je crois, de mettre un bémol dans les descriptions réalistes que nous sommes tentés de faire.

Nicolas Gisin. La décohérence n'explique pas l'entier du processus de mesure, mais une petite partie.

Michel Le Bellac. Elle n'explique pas l'essentiel.

Bernard d'Espagnat. A priori il y aurait deux manières de formuler le résultat. Certains diront que la décohérence explique que le chat est soit vivant, soit mort, d'autres qu'elle explique que nous avons l'impression, soit que le chat est vivant, soit qu'il est mort. Mais la première manière, si on prend ce qu'on dit véritablement au sérieux et si on en explore les conséquences, conduit à des incohérences qui ne sont pas présentes pas dans la seconde.

Nicolas Gisin. Je ne prétends pas du tout que la décohérence explique l'émergence du monde classique. Ce n'est qu'un élément et l'essentiel nous échappe encore.

Bernard d'Espagnat. Bien sûr, nous pouvons toujours dire que la science n'est pas terminée. Mais en l'état actuel des choses, il me semble que nous sommes obligés de mettre de l'eau dans le vin de notre réalisme instinctif, en particulier quand nous parlons de particules.

Nicolas Gisin. Newton aurait-il dû conclure à un réalisme limité du fait que sa théorie qui décrivait si bien l'Univers à son époque impliquait de la non-localité entre la Terre et la Lune ?

Michel Bitbol. C'est ce que Kant a fait. Il a repris la théorie newtonienne et il en a tiré une vision complètement non réaliste de la physique – préservant néanmoins toutes ses conclusions.

Nicolas Gisin. Après coup, nous pouvons considérer que Kant n'était peut-être pas le meilleur des physiciens. Ce n'est pas cela qui a fait faire le plus de progrès à notre science.

Michel Bitbol. En effet.

Jean Petitot. C'est Newton le grand physicien, ce n'est pas Kant. Mais Kant a excellemment clarifié les problèmes philosophiques posés par Newton.

Alexei Grinbaum. Il existe plusieurs types de questions sur la mécanique quantique. Nous ne sommes pas appelés à apporter uniquement des éclairages philosophiques sur la notion de réalisme, mais aussi à poser des questions différentes et non moins fondamentales. C'est par exemple le cas des questions sur le rôle du *no signalling* ou sur l'ordre temporel. Ces questions ne sont pas là pour nous éclairer sur le réalisme des états quantiques, mais elles font néanmoins avancer la compréhension de la mécanique quantique.

Bernard d'Espagnat. Certes ces autres questions que vous mentionnez sont fondamentales elles aussi, et nous devons les étudier. Mais, bien entendu, elles n'éclipsent pas celle du réalisme, et il me semble même que leur examen conduit assez vite à se la poser.

Roger Balian. Une mesure est l'interaction d'un système avec un appareil, qui est dans un certain repère. Il n'est donc pas choquant qu'il n'y ait pas mesure absolue.

François David. Il ne peut même pas y en avoir.

Nicolas Gisin. Le problème de la mesure existe déjà en physique non relativiste.

Roger Balian. Justement, imaginons que ce soit résolu en mécanique non relativiste. Dans un repère privilégié, il n'y a aucune raison...

Nicolas Gisin.... si c'est dans un repère privilégié, je suis d'accord avec vous.

Roger Balian. Une mesure est toujours dans un repère privilégié. L'appareil existe, il est là.

Nicolas Gisin. Quand il y a deux systèmes à distance, nous pourrions imaginer différents ordres temporels.

Roger Balian. Il est très intéressant de comparer ce qui se passe à des distances différentes. Mais il ne faut pas oublier que la mesure est locale pour l'un, locale pour l'autre.

Alexei Grinbaum. Vous n'êtes pas non plus obligés de faire du Bohr ou du Copenhague. L'appareil de mesure n'est pas nécessairement macroscopique.

Roger Balian. Si.

Alexei Grinbaum. Non. Cela c'est du Copenhague.

Roger Balian. Un appareil de mesure est un objet matériel qui obéit aux lois de la mécanique quantique mais qui est quelque part.

Alexei Grinbaum. Il peut très bien ne pas être macroscopique ou ne pas avoir de température.

Roger Balian. Si, il faut qu'il soit macroscopique. Sinon il n'enregistre pas. L'expérience de Nicolas Gisin est, à ce titre, très intéressante : le moment où l'on enregistre n'est pas le premier moment.

Bernard d'Espagnat. Cet exposé et ce débat ont été très instructifs et lourds de questions. La leçon que j'en tire personnellement est très simple. C'est que le réel, si tant est qu'il soit accessible ce qui est très problématique, n'a plus rien à voir avec l'image du monde que s'était construite le pseudo-rationalisme scientifique un tant soit peu triomphaliste que j'ai connu dans ma jeunesse.

Cela dit, cher Nicolas, merci au nom de tout le monde pour ce magnifique exposé.