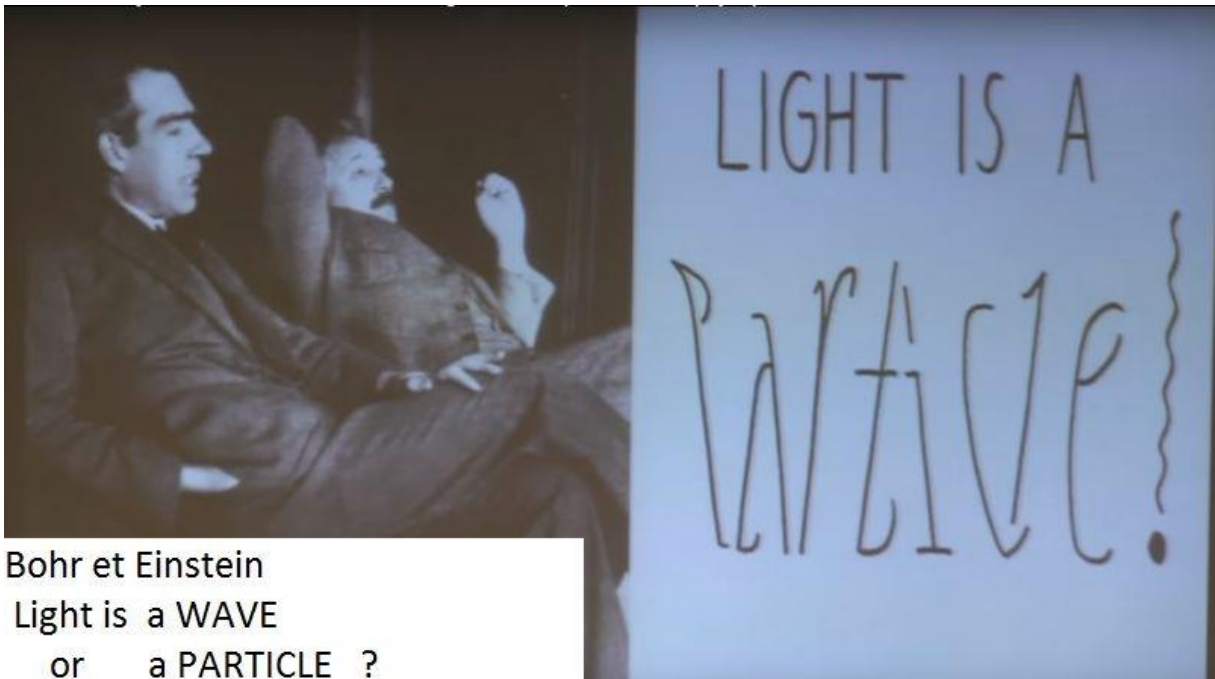


L'INTRICATION QUANTIQUE



Bohr et Einstein
Light is a WAVE
or a PARTICLE ?

Photo du 11/12/1925 par Paul Ehrenfest

www.loutrel.org 6/2/25

L'intrication quantique

-elle se constate

- elle se mesure même

Mais... on ne la comprend pas du tout !

Une caractéristique absolument surprenante des particules quantiques (photon, électron etc) est que deux particules quantiques intriquées (dites aussi enchevêtrées, ou encore jumelles) constituent UN SEUL ET MÊME OBJET !!

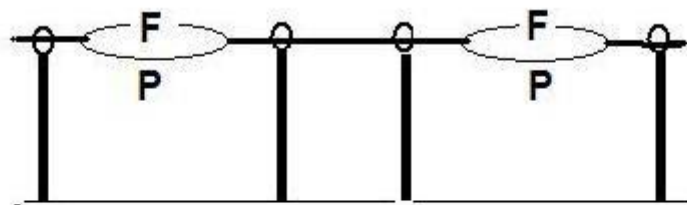
« Et alors » dira-t-on ? Eh bien l'énormité de la chose est que cet objet unique peut « s'étaler » dans l'espace sans aucune limite de distance....

L'éloignement n'est plus un critère pour distinguer entre les deux parties d'un même objet...

Pour essayer de s'en faire une idée

Une petite expérience dans notre monde macroscopique indifférent aux effets quantiques.

Deux pièces de monnaie sont soudées alignées face (F) vers le haut sur un axe commun. Cet axe est soutenu par 4 supports sur lesquels il peut tourner. On lance une rotation rapide puis on l'arrête, les pièces montrant toutes deux soit F soit P (on négligera les positions intermédiaires).



2 pièces soudées sur le même axe

On obtient sur un grand nombre de lancers autant de FF que de PP. Par contre, si l'on sectionne l'axe en son milieu et que l'on fait tourner chaque pièce indépendamment, on obtient les 4 configurations possibles PP, FF, FP et PF.

Chacune de ces 4 configurations équiprobables a donc une probabilité de $\frac{1}{4} = 0.25$.

Par exemple sur 1000 essais, on trouvera à peu près 250 PP, 250 FF, 250 FP et 250 PF.

Il serait tout à fait surprenant et incompréhensible de constater des probabilités différentes pour ces configurations (telle que 400 PP, 400 FF, 100 FP et 100 PF) et pourtant c'est bien

C'est l'équivalent de ce comportement que l'on observe dans le domaine quantique.

*On parle de **non-localité**, de **non-séparabilité**.*

Cette conséquence de la théorie quantique n'a jamais voulu être admise par le grand Einstein, et a donné lieu à un article célèbre en 1935, dit EPR, pour Einstein, Podolsky, Rosen, ses deux coauteurs.

*Einstein ne pouvait tolérer l'existence d'une « action fantomatique à distance » entre deux particules et, ajoutant l'insulte à la blessure, cette connexion s'effectue **instantanément**, donc non limitée par la vitesse de la lumière !!*

Pour lui, la théorie quantique était « incomplète », il manquait des « variables cachées », à découvrir en creusant la théorie.

Depuis 1935, article EPR, la question restait ouverte, mais intéressait peu de physiciens, ceux-ci se contentant d'utiliser la très efficace mécanique quantique sans se poser trop de questions.

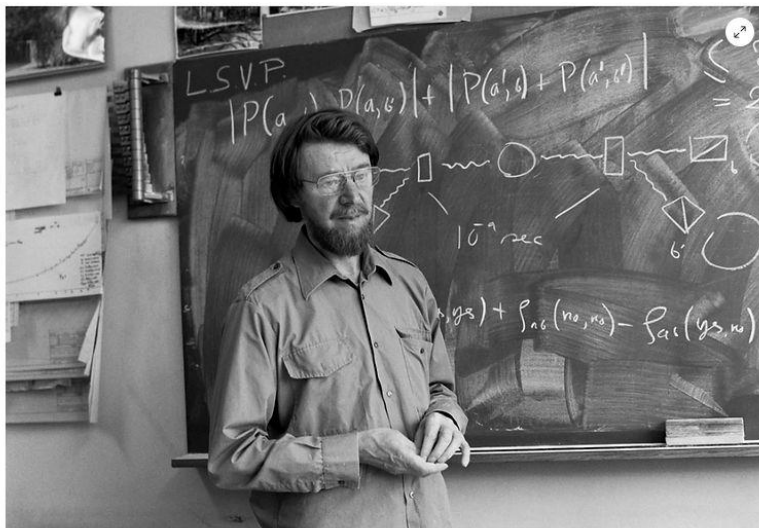
La devise implicite était :

« Shut-up and compute »

Puis en 1964 John Bell est arrivé...

En 1964 le physicien Irlandais au CERN en Suisse, John Bell, ressortit cette question de l'oubli et inventa un test pratique pour la trancher.

Et depuis 1982, date d'une expérience décisive effectuée par le physicien Alain Aspect à la Faculté d'Orsay (Prix Nobel en 2022), ce comportement paradoxal a été prouvé et reprouvé des centaines de fois lors d'expériences comparables.



John Bell au CERN en 1982. Son célèbre théorème démontre l'un des résultats les plus spectaculaires de la physique du XXe siècle : la non-localité (ou non-séparabilité) quantique qui dit que si deux particules sont intriquées, alors toute action sur l'une (par exemple une mesure) agit instantanément sur l'autre. Même si

J Bell a apporté une **modélisation mathématique** du problème de l'intrication quantique.

Partant des résultats d'expérience il a défini une relation entre les probabilités recueillies.

$$-2 \leq S(a, a', b, b') \leq +2$$

*Cette relation est une inégalité qui doit être obligatoirement satisfaite si les particules jumelles possèdent **dès leur émission** l'information nécessaire pour leur comportement ultérieur.*

Autrement dit, chaque particule partirait avec un « ordre de mission » concernant son comportement vis à vis d'un polariseur. Exemple d'ordre de mission :

‘Si tu trouves le polariseur orienté à moins de 30° de la verticale, OK traverse-le ‘

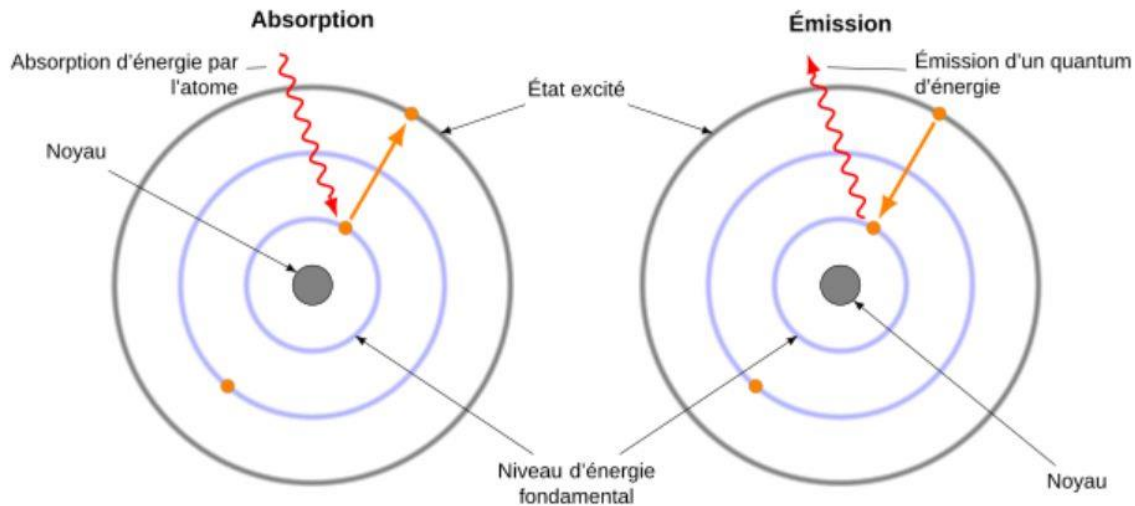
*Dans le domaine, on parle de **variables cachées** plutôt que d'ordres de mission.*

***Einstein** était partisan de l'existence de ces variables cachées indispensables pour compléter la Mécanique Quantique.*

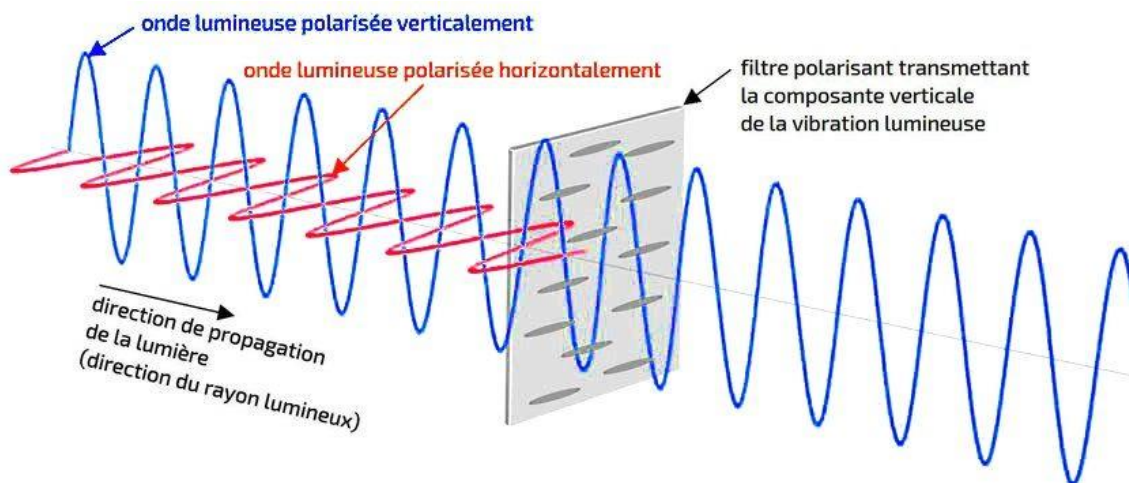
Or, les expériences d'Alain Aspect (1982) ont montré clairement que l'inégalité de Bell était grandement violée. Ceci prouve donc que les photons jumeaux sont émis et voyagent « sans bagage informationnel » .

L'INTRICATION QUANTIQUE

Ce ne sont pas des pièces de monnaie mais des photons qui ont été utilisé par A. Aspect.



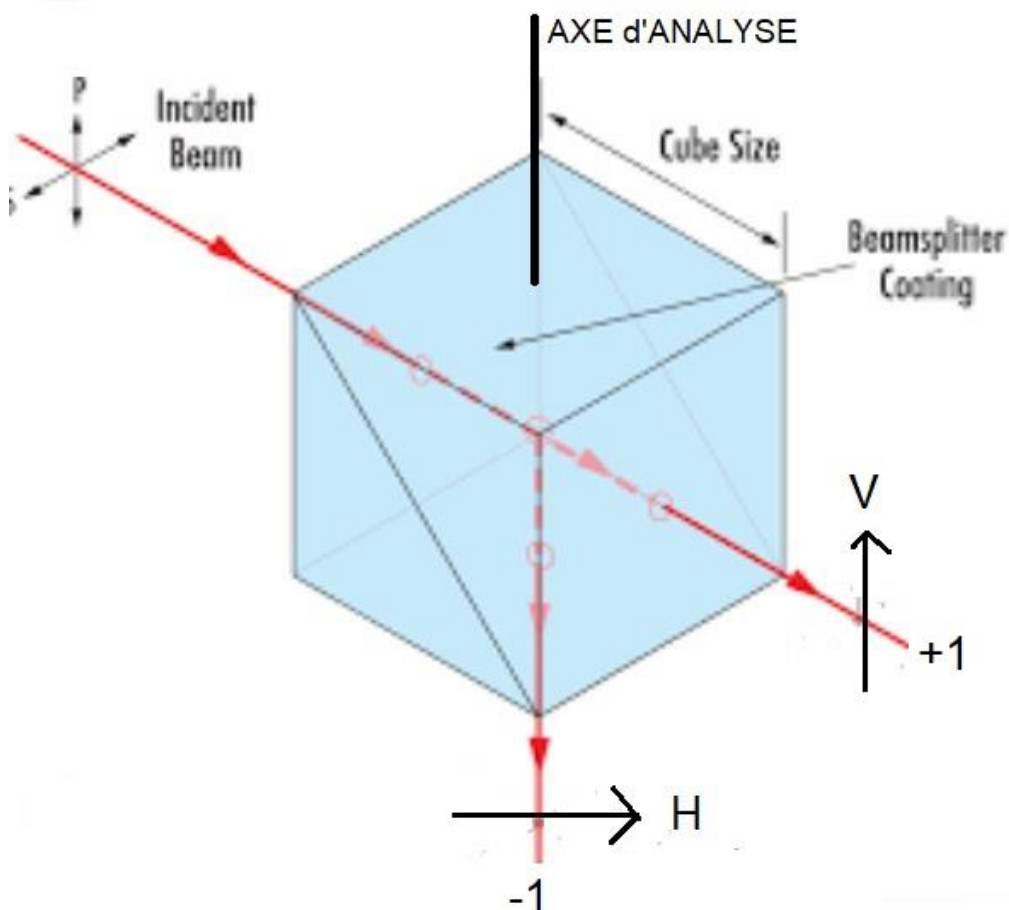
Il a fallu 5 ans pour produire une source de photons « jumeaux », intriqués en polarisation.



N.B. La vibration représentée est celle du champ électrique ;
la couleur rouge / vert permet de différencier les directions de polarisation et n'a rien à voir avec la couleur de la lumière.

(<https://science.maignuet.org/phy/optique/polarisation.htm>)

L'INTRICATION QUANTIQUE

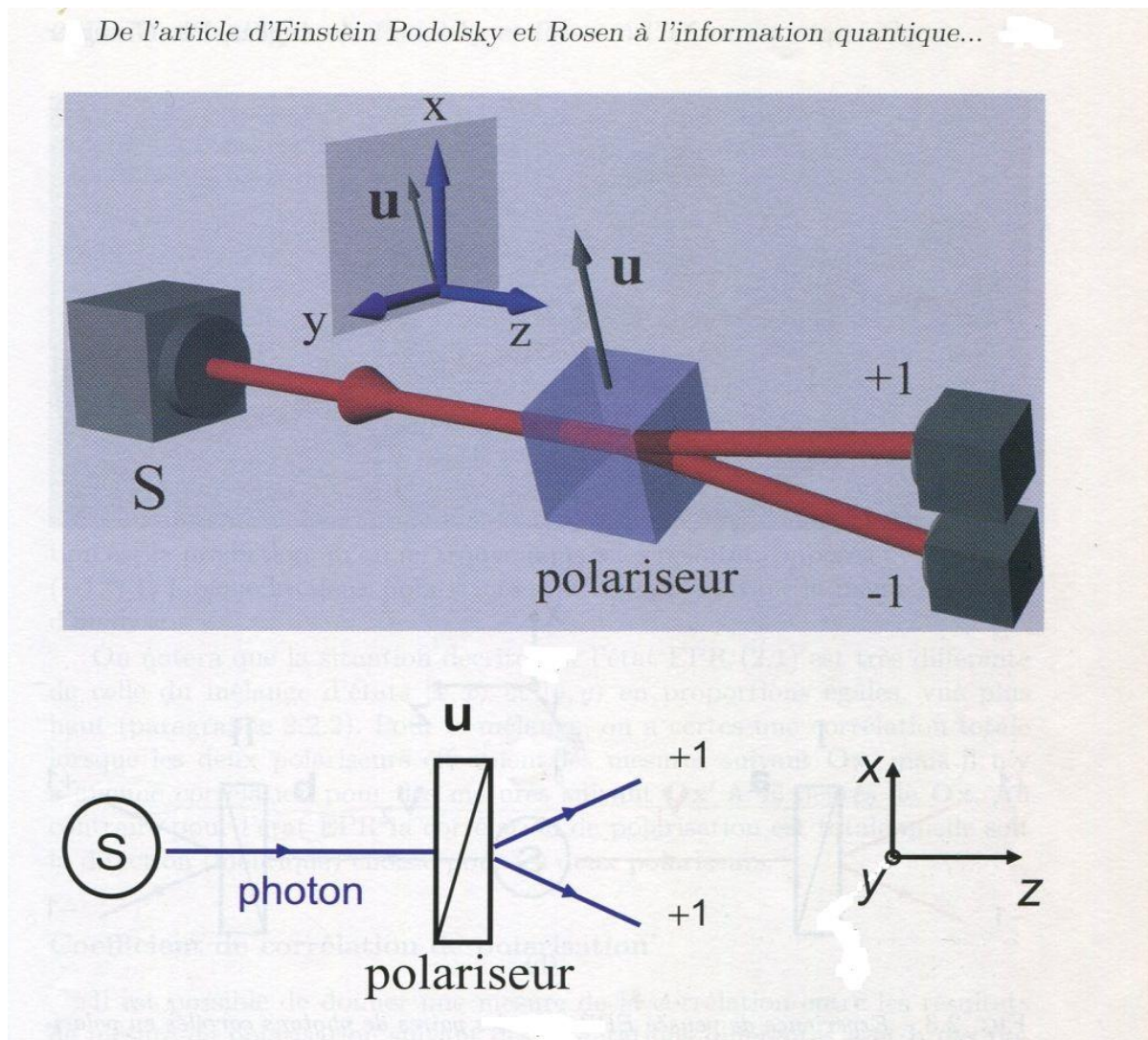


Polariseur à 2 voies 1 photon ressort
-soit dans la voie V
-soit dans la voie H

*Les deux photons d'une paire sont polarisés
-soit tous deux verticalement
-soit tous deux horizontalement
par rapport à l'axe d'analyse du polariseur.*

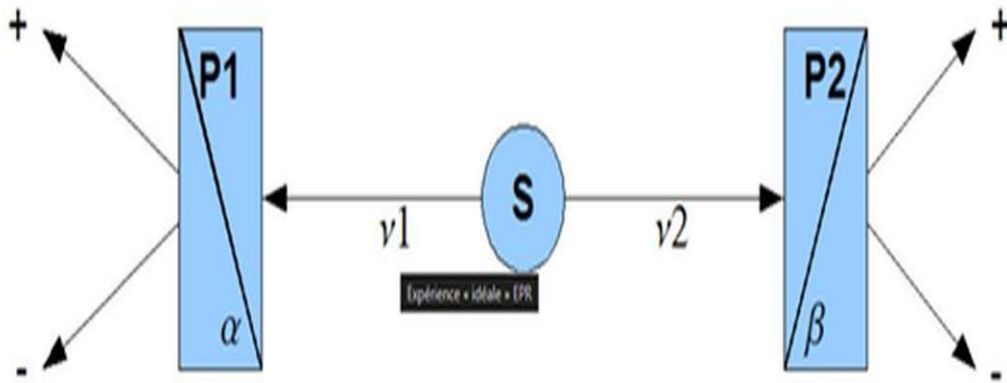
L'INTRICATION QUANTIQUE

Première expérience à 1 angle par polariseur



Einstein aujourd'hui, CNRS Editions

L'INTRICATION QUANTIQUE



La source S émet des paires de photons intriqués chaque photon visant un polariseur P .

Prenons des axes d'analyse des polariseurs parallèles, soit sur cette figure $\alpha = \beta = 0^\circ$.

A la sortie de $P1$, un photon V ira dans la sortie $+1$ et un photon H ira dans la sortie -1 , probabilité $\frac{1}{2}$.

Idem pour le polariseur $P2$, avec une probabilité $\frac{1}{2}$.

Jusqu'ici rien de surprenant, mais comparons les séquences des sorties des deux polariseurs.

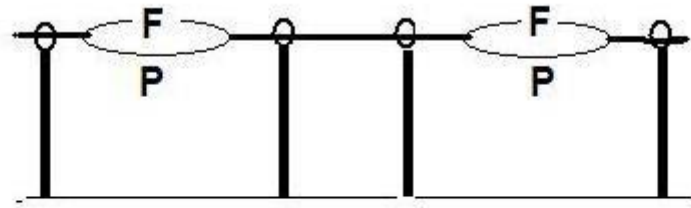
$P1$ $+1$ $+1$ -1 $+1$ -1 $+1 \dots$ Aléatoire

$P2$ $+1$ $+1$ -1 $+1$ -1 $+1 \dots$ Aléatoire

*On constate alors que les deux photons d'une même paire **sortent par la même voie** de leurs polariseurs respectifs. C'est une corrélation totale.*

L'INTRICATION QUANTIQUE

*Comme dans le cas des pièces de monnaie reliées
elles par un axe....*



2 pièces soudées sur le même axe

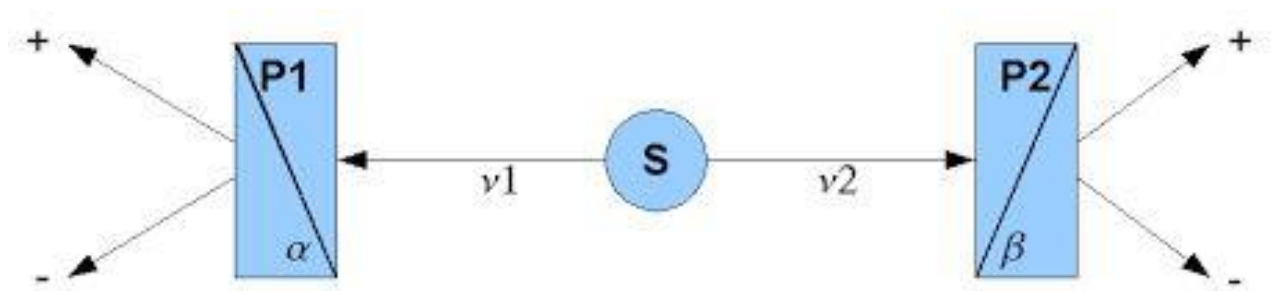
P1 F F P F P P... Aléatoire

P2 F F P F P P... Aléatoire

mais parfaite corrélation pour la paire.

*A ce jour nul ne sait quel est l'équivalent pour les
photons de l'axe soudé entre les pièces dans une
expérience d'intrication.*

L'INTRICATION QUANTIQUE



Le schéma ci-dessus représente le schéma de principe à partir duquel John Bell a démontré ses inégalités : une source de photons intriqués S émet simultanément deux photons ν_1 et ν_2 dont la polarisation est préparée de telle manière que le vecteur d'état de l'ensemble des deux photons soit :

$$|\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow, \uparrow\rangle + |\rightarrow, \rightarrow\rangle \}$$

Cette formule signifie tout simplement que les photons sont en état superposé : tous les deux en polarité verticale, ou tous deux en polarité horizontale, perpendiculaire, avec une probabilité égale.

Ces deux photons sont ensuite mesurés par deux polariseurs P1 et P2, chacun ayant un angle de mesure paramétrable α et β . Le résultat de la mesure de chaque polariseur est (+) ou (-) selon que la polarisation mesurée est respectivement parallèle ou perpendiculaire à l'angle de mesure du polariseur.

Étant donné le dispositif et l'état de polarisation initial donné aux photons, la mécanique quantique permet de prédire les probabilités de mesurer (+,+), (-,-), (+,-) et (-,+) sur les polariseurs (P1,P2), orientés sur les angles (α, β) ; pour rappel :

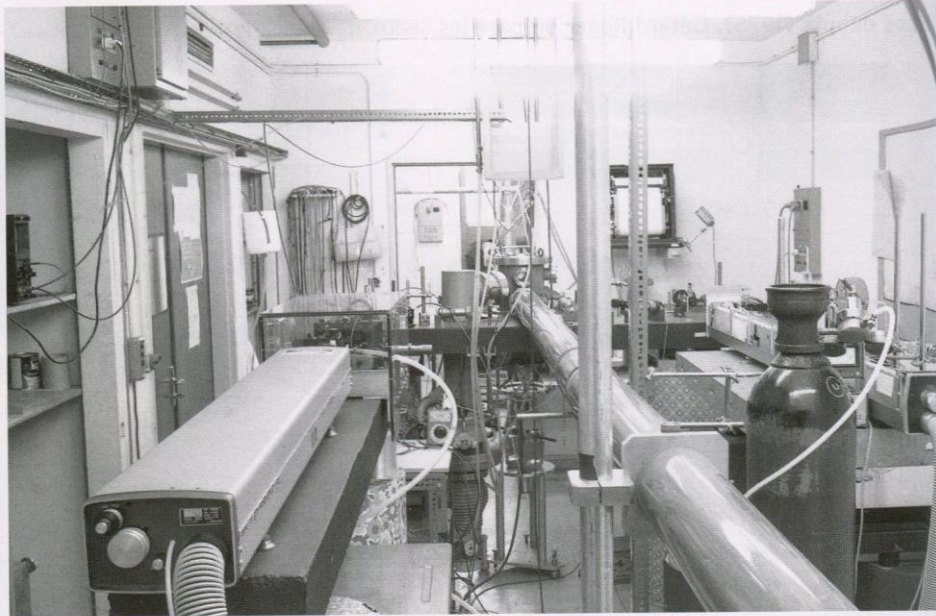
$$P_{++}(\alpha, \beta) = P_{--}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta)$$

$$P_{+-}(\alpha, \beta) = P_{-+}(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \sin^2(\alpha - \beta)$$

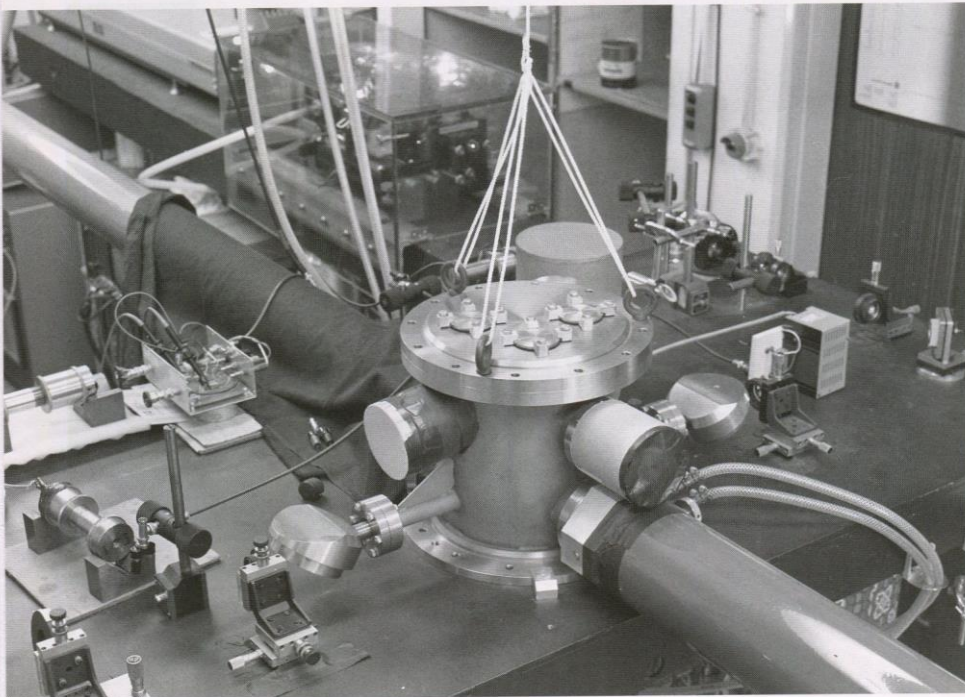
On peut démontrer (voir article [Inégalités de Bell](#)) que la violation maximale des inégalités est prévue pour $|\alpha - \beta| = 22,5^\circ$.

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_d%27Aspect)

L'INTRICATION QUANTIQUE



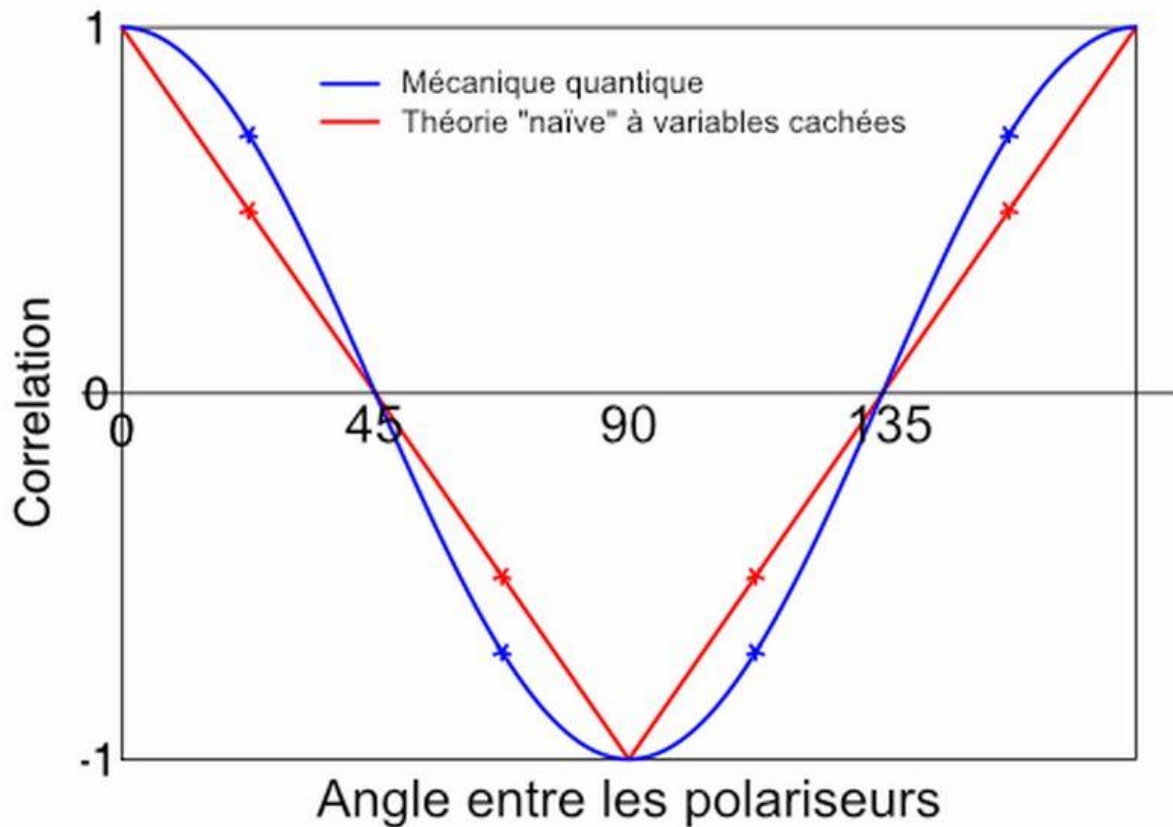
4. Le cœur de l'expérience. On distingue l'enceinte à vide contenant le jet atomique (au milieu), avec de part et d'autre les fenêtres d'entrée des lasers d'excitation, ainsi que les voies de sortie des photons intriqués (protégées par les gros tuyaux en plastique). (Photothèque Institut d'Optique.)



Orsay 1980/1982

Alain Aspect ,Si Einstein avait su..., Odile Jacob

L'INTRICATION QUANTIQUE



Pour les angles les plus « classiques »

0°

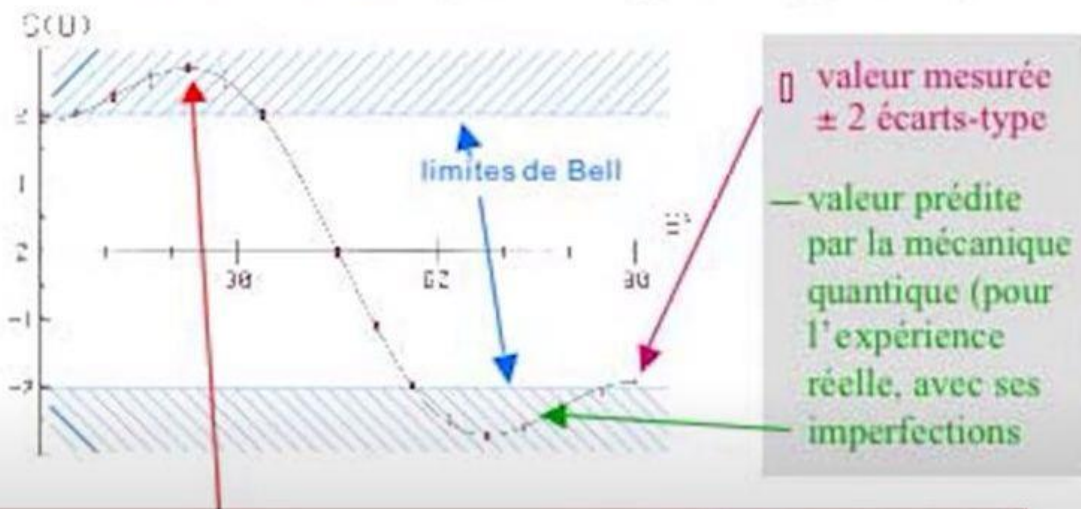
45°

90°

Les deux courbes coïncident.

C'est par le calcul que les angles de 22°5 et 67°5 ont été trouvés.

Expérience avec polariseurs à deux voies (AA, P. Grangier, G. Roger, 1982)



Pour $\theta = (a, b) = (b, a') = (a', b) = 22.5^\circ$ $S_{\text{exp}}(\theta) = 2.697 \pm 0.015$

Violation des inégalités de Bell $S \leq 2$ par plus de 40 écarts-type

Excellent accord avec les prédictions quantiques: $S_{\text{MO}} = 2.70$

...

Alors, a-t-on inventé un télégraphe « supra-luminique » ?

Alice peut-elle envoyer un message instantanément (plus vite que la lumière) à Bob ?

Eh bien non, désolé On constate expérimentalement un double paradoxe dans le monde quantique par rapport à notre monde habituel :

- *les photons de la paire intriquée se comportent comme s'ils étaient reliés en permanence*
- *la mesure de l'état de l'un est répercutée sur l'autre, instantanément, c'est à dire à une vitesse infinie, en violation semble-t-il du Principe de Relativité*

En réalité le Principe de Relativité est respecté car aucune information utilisable n'est échangée entre Alice et Bob.

En effet, Alice ne peut imposer une valeur H ou V de son choix à transmettre à Bob, car la polarisation de son photon est par essence aléatoire avant la mesure.

*Seule une **corrélation instantanée** est observée entre les deux photons. Or il n'existe*

-aucune contrainte sur la vitesse de propagation d'une corrélation.

-ni sur la distance, une expérience Chinoise l'a vérifié en 2017 entre la Terre et un satellite.*

*En conclusion comme déjà mentionné, il est fort dérangeant pour notre logique habituelle de **constater expérimentalement** que :*

L'éloignement n'est plus un critère pour distinguer entre les deux parties d'un même objet quantique...

*En 2017, Juan Yin et al. (université des sciences et des technologies de [Hefei](#), en Chine) ont envoyé des photons intriqués depuis le satellite [QUESS](#) (Quantum Experiments at Space Scale), orbitant à 500 km, vers des stations terrestres séparées de 1 203 kilomètres — [Delingha](#), dans le nord du [plateau tibétain](#) et l'observatoire Gaomeigu de [Lijiang](#)

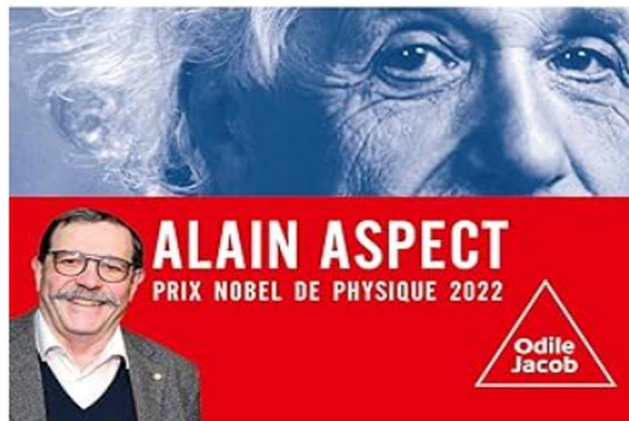
https://fr.wikipedia.org/wiki/Intrication_quantique

Les applications

L'intrication quantique n'est pas seulement une curiosité scientifique ; elle a des applications concrètes dans plusieurs domaines :

- Cryptographie quantique : Utilisation de l'intrication pour sécuriser les communications.*
- Téléportation quantique : Transfert d'états quantiques d'une particule à une autre à distance.*
- Ordinateur quantique : Exploitation de l'intrication pour réaliser des calculs à une vitesse inégalée par les ordinateurs classiques dans des domaines bien précis.*

Alain Aspect
Prix Nobel de physique
Si Einstein
avait su



Et pour découvrir le monde quantique

L'INTRICATION QUANTIQUE

Le livre.com

SVEN ORTOLI, JEAN-PIERRE PHARABOD

LE CANTIQUE DES QUANTIQUES

LE MONDE EXISTE-T-IL ?



POUR VOUS EN SAVOIR PLUS
TOUTES LES SEMAINES

KLEIN PETIT VOYAGE DANS LE MONDE DES QUANTA

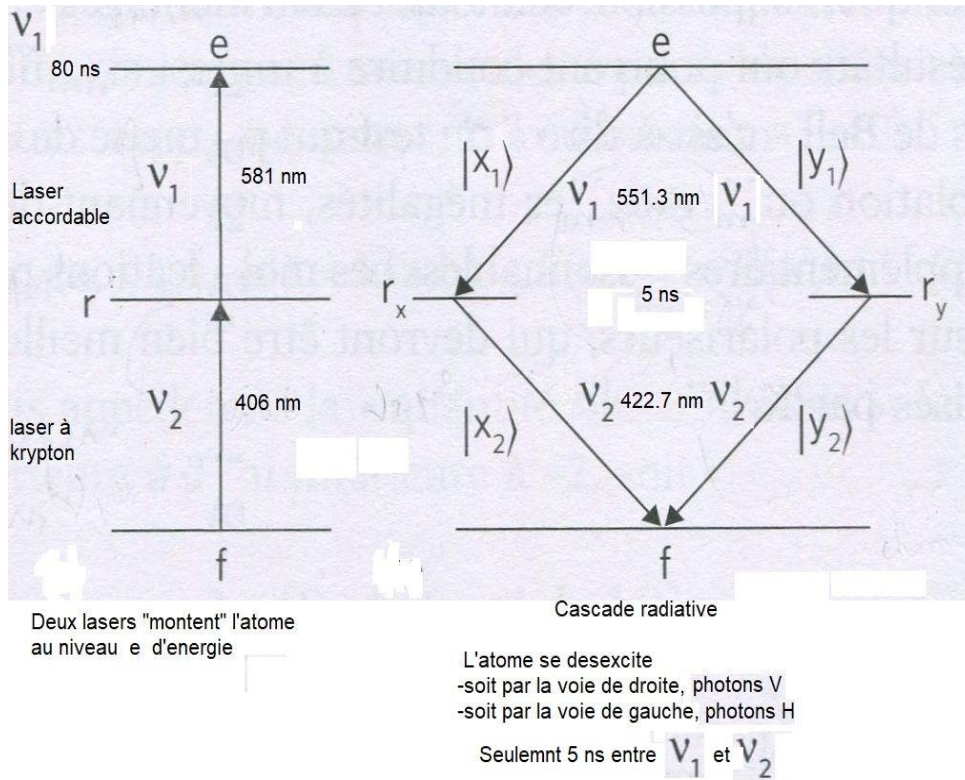


Champs
Flammarion

L'INTRICATION QUANTIQUE

L'INTRICATION QUANTIQUE

Génération d'une paire de photons intriqués en polarisation



Un four émet un jet d'atomes de calcium au niveau d'énergie f.

Il faut deux lasers (un au krypton et un adaptable) pour monter en deux étapes au niveau d'énergie e qui dure 80 ns.

Ensuite l'atome se désexcite vers le niveau d'énergie r intermédiaire qui est dédoublé (rx et ry),

y reste environ moins de 10 ns puis retombe au niveau f.

Les chemins $|x_1, x_2\rangle$ et $|y_1, y_2\rangle$ étant indiscernables, on peut ajouter ces deux états

Pour donner un nouvel état quantique

$$\Psi = 1/\sqrt{2} (|x_1, x_2\rangle + |y_1, y_2\rangle)$$

dit état « EPR-Bell ».

On parle de « cascade radiative ».

Une lentille dans chaque voie horizontale collecte les photons et les rassemble en un faisceau étroit, aux rayons quasi parallèles.

Un filtre (551.3 nm) sélectionne les photons ν_1 vers le gauche et un autre filtre (422.7 nm) les photons ν_2 vers la droite.

Si le délai entre la détection de ces deux photons après les polariseurs est inférieur à 10 ns, on est sûr qu'ils proviennent de la même paire et sont donc polarisés orthogonalement.

Corrélation entre les mesures

Suivant les orientations des polariser, angles a et b on définit un **coefficient de corrélation** $E(a,b)$ à partir des probabilités de résultat $+1$ ou -1 .

Notation : $P_{++}(a,b)$ est la probabilité **conjointe** d'obtenir $+1$ pour le photon $v1$ à gauche , polarisateur orienté suivant a , ET $+1$ à droite pour $v2$, polarisateur orienté suivant b .

Généralisé à $P_{--}(a,b)$, $P_{+-}(a,b)$ et $P_{-+}(a,b)$.

Le coefficient de corrélation est alors

$$\begin{aligned} E(a,b) &= P_{++}(a,b) + P_{--}(a,b) - P_{+-}(a,b) - P_{-+}(a,b) \\ &= [(P_{++}(a,b) + P_{--}(a,b)) - (P_{+-}(a,b) + P_{-+}(a,b))] \end{aligned}$$

Résultats identiques - Résultats opposés

Par exemple, une corrélation totale $E = 1$ est observé quand

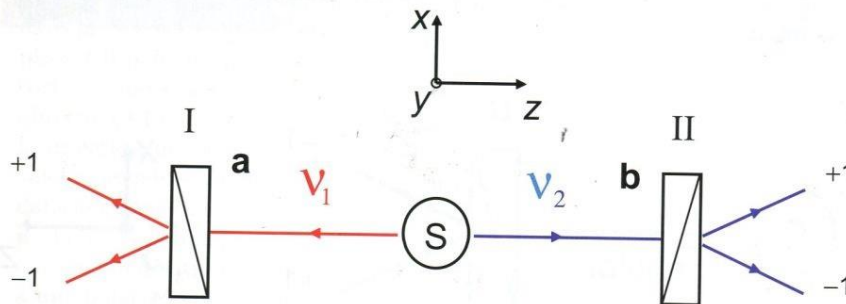
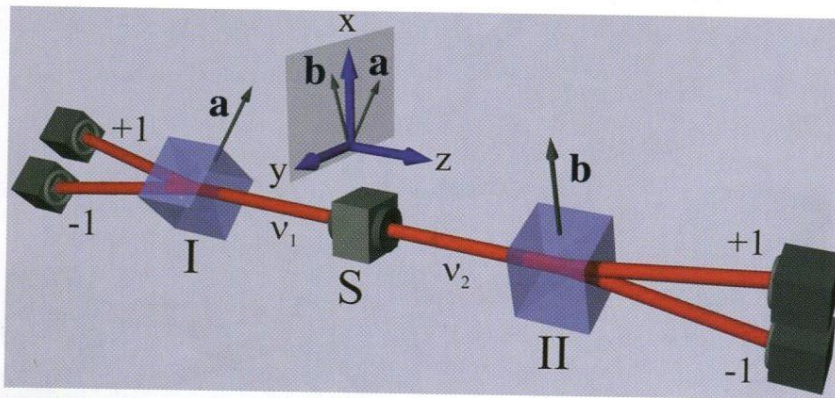
$$P_{++} = P_{--} = \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad P_{+-} = P_{-+} = 0$$

Inversement une corrélation nulle est observée quand

$$P_{++} = P_{--} = P_{+-} = P_{-+} = \frac{1}{4}$$

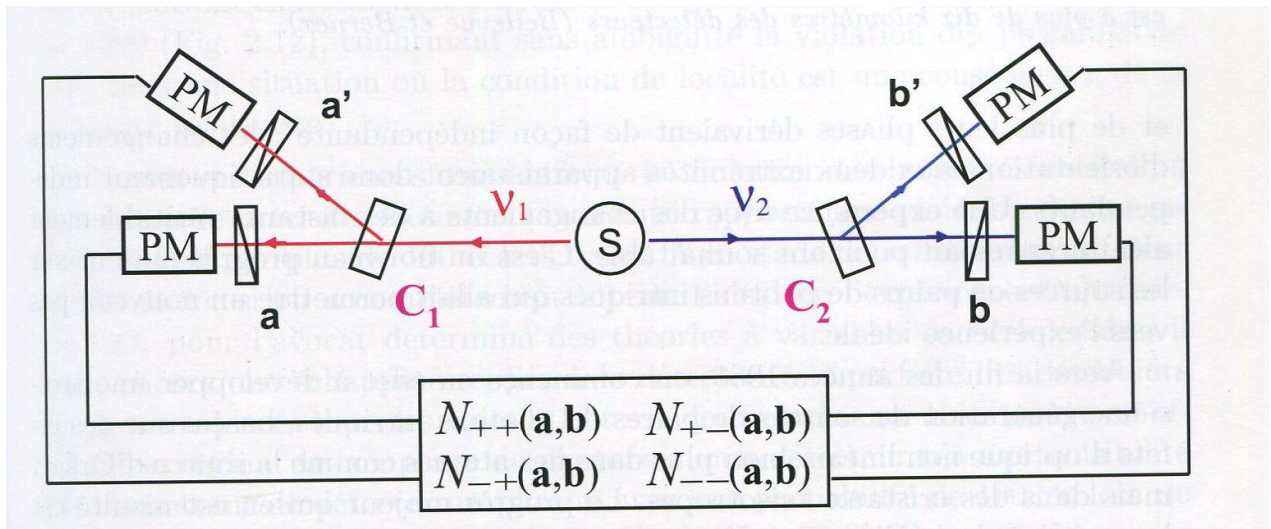
Expérience à 4 angles de mesure

En théorie, il faudrait faire pivoter quasi instantanément chaque polariseur pour passer de a à a' ou b à b' , ce qui est impossible en pratique vu la masse de ces appareils.



D'où la nécessité de deux commutateurs C1 et C2 qui orientent les 2 faisceaux vers 2 polariseurs supplémentaires préréglés aux angles a' et b' .

L'INTRICATION QUANTIQUE



(Einstein aujourd'hui, CNRS éditions)

On a alors 4 coefficients de corrélation $E(a,b)$, $E(a,b')$, $E(a',b)$ et $E(a',b')$

L'astuce géniale de Bell a été double :

-rassembler ces corrélations en une somme S

-introduire un signe – devant $E(a,b')$

$$S(a,a',b,b') = E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')$$

On prouvera plus loin que pour toute théorie à paramètre supplémentaire, nécessairement

$$-2 \leq S(a,a',b,b') \leq +2$$

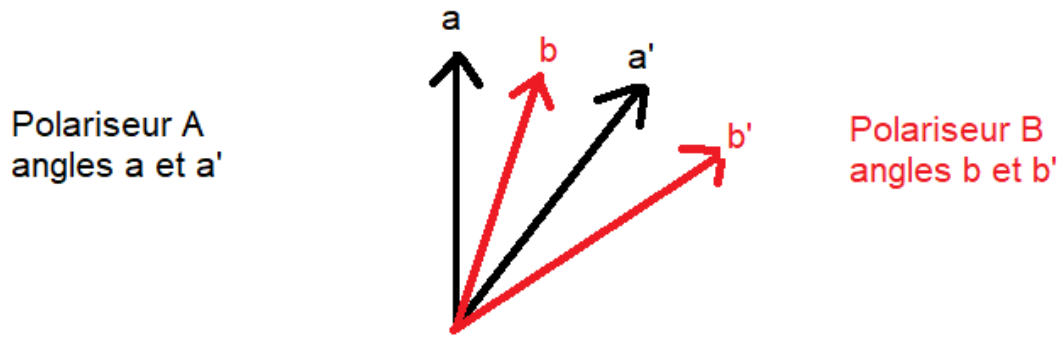
C'est la célèbre inégalité de Bell, largement violée expérimentalement puisque A. Aspect a obtenu

$$S_{\text{exp}}(a,a',b,b') = 2.697 \pm 0.015$$

avec les angles $(a,b) = (b,a') = (a',b') = 22^\circ 5'$

L'INTRICATION QUANTIQUE

VIOLATION MAXIMALE DES INEGALITES DE BELL



Les 3 angle $22^\circ 5$

Un point crucial de cette expérience est donc le commutateur, inventé pour la circonstance, qui permet de basculer le faisceau pour le choix entre a et b , et a' , b' en moins de 10 ns. Or la distance entre les deux commutateurs étant de 12 m, la lumière met 40 ns à la parcourir.

On voit donc qu'aucun signal éventuel ne pourrait être échangé entre les commutateurs.

Démonstration de l'inégalité de Bell

On introduit pour chaque paire un paramètre supplémentaire λ , et l'on va prouver que l'existence d'un tel paramètre conduit à l'inégalité

$$-2 \leq S(a, a', b, b') \leq +2$$

État pur [modifier | modifier le code]

Dans le cas où le système global $\{S_1 + S_2\}$ peut être décrit par un **vecteur d'état**, son **état** est un **vecteur** de l'espace de Hilbert $H_1 \otimes H_2$. Certains états peuvent s'écrire sous la forme d'un **produit tensoriel** entre un état de S_1 et un état de S_2 :

$$|\Psi_{1+2}\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle = |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle$$

Ces états sont appelés *états séparables* ou *factorisables*. Le système S_1 est dans un état quantique clairement identifié, $|\psi_1\rangle$, qui n'est pas altéré par les mesures effectuées sur S_2 .

Un *état intriqué* est par définition un état non séparable, qui s'écrit en général sous la forme

$$|\Psi_{1+2}\rangle = a |\varphi_1\rangle |\varphi_2\rangle + b |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle + \dots$$

C'est donc une **superposition d'états** d'un système biparti. Pour illustrer la différence entre états séparables et intriqués, supposons par exemple que $\{|+\rangle_1, |-\rangle_1\}$ forme une base de l'espace H_1 , et $\{|+\rangle_2, |-\rangle_2\}$ une base de l'espace H_2 . L'état :

$$|\Psi_{\text{sep}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle_1 |-\rangle_2 - |-\rangle_1 |-\rangle_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle_1 - |-\rangle_1) \otimes |-\rangle_2$$

est un état séparable, puisqu'il peut être factorisé comme indiqué ci-dessus, tandis que l'état :

$$|\Psi_{\text{int}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle_1 |-\rangle_2 - |-\rangle_1 |+\rangle_2)$$

est un état intriqué.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Intrication_quantique

Inégalité de Bell

Elle est basée sur une expérience à 4 angles polariseurs : a , a' et b, b' .

*Bell définit la notion de « **localité** des paramètres supplémentaires » :*

le résultat de mesure donné par un polariseur ne dépend que

-du paramètre porté par le photon

-de l'orientation du polariseur

mais pas de l'orientation de l'autre polariseur.

*Pour chaque paire, Bell introduit **un paramètre λ** le même pour les deux photons, qui détermine le résultat de chaque mesure.*

λ peut désigner un ensemble de paramètres.

Le résultat des mesures aux polarisateurs sont les fonctions $A(\lambda, a)$ et $B(\lambda, b)$ qui peuvent prendre les seules valeurs $+1$ et -1 .

La valeur moyenne sur l'ensemble des paires donne le coefficient de corrélation

$$E(a,b) = \text{moy}[A(\lambda, a).B(\lambda, b)]$$

En préalable à la démonstration, on utilise cette propriété s de 4 nombres qui ne peuvent être que +1 ou -1.

$$s = x_1y_1 - x_1y_2 + x_2y_1 + x_2y_2$$

réécrit en

$$s = x_1(y_1 - y_2) + x_2(y_1 + y_2)$$

s vaut soit +2 soit -2. En effet

-soit $y_1 = y_2$ et le second terme vaut +2 ou -2

-soit $y_1 = -y_2$, et le premier terme vaut +2 ou -2

Maintenant remplaçons x_1, x_2, y_1, y_2 par $A(\lambda, a)$ etc

$$s = A(\lambda, a) B(\lambda, b) - A(\lambda, a) B(\lambda, b') + A(\lambda, a') B(\lambda, b) + A(\lambda, a') B(\lambda, b')$$

En prenant la moyenne sur toutes les paires

$$S(a, a', b, b') = E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')$$

Or S est la moyenne d'une quantité qui vaut soit +2 soit -2. Elle est donc nécessairement comprise entre +2 et -2.

D'où l'inégalité de Bell

$$-2 \leq S(a, a', b, b') \leq +2$$

CONTRADICTION avec la théorie QUANTIQUE

Celle-ci donne pour la corrélation

$$E_{mq}(a, b) = 2 \cos(a, b)$$

On considère les 3 angles

$$(a, b) = (b, a') = (a', b') = 22^\circ 5'$$

$$E_{mq}(a, b) = E_{mq}(a', b) = E_{mq}(a', b') =$$

$$\cos \pi/4 = 1/\sqrt{2}$$

La quatrième orientation relative vaut

$$(a, b') = 67^\circ 5' = 3 \pi/4 = -1/\sqrt{2}$$

D'où la prévision quantique idéale

$$S_{mq}(a, a', b, b') = 2\sqrt{2} \approx 2.828..$$

Ramenée à $S_{mq} = 2.7 \pm 0.005$ en prenant en compte les imperfections résiduelles des polariseurs.

Le résultat des expériences a été

$$S_{mesuré} = 2.697 \pm 0.015$$

Soit une violation de l'inégalité de Bell par plus 40 « barres d'incertitude ».

L'INTRICATION QUANTIQUE