

Alain ASPECT, Prix Nobel 2022 de Physique



Alain Aspect, Prix Nobel 2022

Prix Wolf de Physique et Médaille Albert Einstein

Le Français Alain Aspect, l'Américain John Clauser et l'Autrichien Anton Zeilinger ont remporté le Nobel de physique 2022 pour leurs découvertes sur « ***l'intrication quantique*** », un phénomène où deux particules sont parfaitement corrélées, quelle que soit la distance qui les sépare.

La non-séparabilité : une expérience qui révolutionne notre connaissance de l'Univers !

Nos astrophysiciens, après de longues hésitations, estiment que l'Univers est cohérent, mais pour qu'après quelque 13 milliards d'années il n'ait pas évolué vers le chaos il faut qu'un système informationnel quasi instantané gère sa structure. Or, le seul vecteur informationnel que nous connaissions est le système photonique qui, à 300 000 kilomètres à la seconde, se déplace à une vitesse d'escargot dans le gigantesque Univers !

Dans le monde visible, rien ne pouvant aller plus vite que la lumière, il ne constitue donc pas un système informationnel idéal.

Il doit donc exister des informations qui se propagent à travers l'espace à une vitesse supérieure à celle de la lumière, voire quasi instantanées !

Or, il semblerait que dans le monde quantique les informations peuvent agir instantanément et sur de très longues distances.

Ce sont Erwin Schrödinger et Albert Einstein qui ont découvert au milieu des années 1930 le phénomène d'intrication dans les équations de la théorie quantique dont ils étaient parmi les plus importants pères fondateurs.

Mais, Albert Einstein, qui fut l'un des pionniers de la théorie quantique en interprétant l'effet photoélectrique en termes de photons, n'accepta jamais le caractère non déterministe de celle-ci, prônée par l'école de Copenhague. Il ne pouvait admettre que connaissant l'état initial d'un système, on ne puisse pas prédire avec certitude les résultats d'une mesure mais seulement calculer les probabilités de les obtenir. « *Dieu ne joue pas aux dés !* » s'était-il écrié.

« *Au lieu d'affirmer que Dieu ne joue pas aux dés, demandons-nous plutôt pourquoi il joue aux dés* » Répondit en 2012 le physicien Nicolas Gisin dans son livre « L'Impensable Hasard, non-localité, téléportation et autres merveilles quantiques ».

En effet, le concept de non-localité paraît difficile à accepter dans le cas d'une logique normale. Par exemple, dans l'expérience de la double fente de Young, lorsqu'un électron franchit celle-ci et s'approche d'un détecteur, la mécanique quantique dit que, immédiatement avant d'être détecté, il a la liberté de choix d'apparaître où il veut. Autrement dit, chaque canal du détecteur a une chance de l'attraper. Mais, dès qu'il est détecté par l'un d'eux, on peut alors dire que la probabilité de sa présence dans ce canal est de 100 % et que, instantanément, la potentialité de sa présence partout ailleurs dans l'espace est de zéro !

Il s'agit d'un évènement baptisé « non-local ».

Cela signifie qu'il existe des influences dont les effets sont supra-luminiques !

Le fait que rien ne peut aller plus vite que la lumière serait vrai dans un monde visible de matière et faux dans le domaine quantique ?

Ce type de manifestation est souvent invoqué (peut-être à tort ?) dans le cas de la télépathie entre jumeaux où il y aurait transfert de pensées de l'un à l'autre sur de grandes distances.

Einstein n'accepta pas ce raisonnement et, pour démontrer le caractère incomplet de cette théorie, avec deux de ses collaborateurs, Boris Podolsky et Nathan Rosen il mit au défi en 1935 les tenants de l'école de Copenhague de démontrer expérimentalement cette notion de non-localité.

C'est la fameuse expérience de pensée appelée aussi **le paradoxe E.P.R.** c'est-à-dire les initiales des trois savants.

Ils formulèrent trois hypothèses à confirmer ou à infirmer :

- 1 Les prédictions de la mécanique quantique sont justes.
- 2 Aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière.
- 3 Aucune interaction instantanée à distance.

EPR et Inégalités de Bell

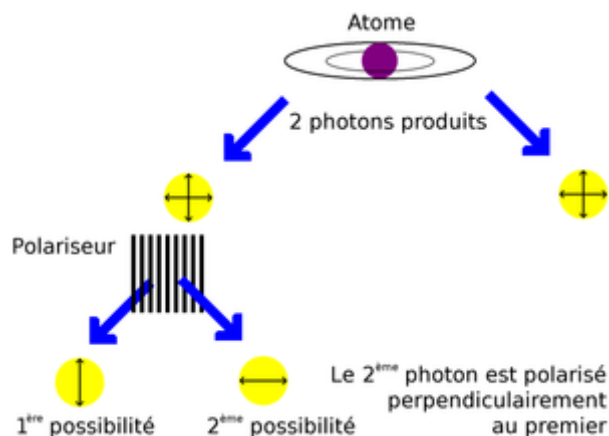


Schéma d'une expérience décrivant le paradoxe EPR :

Dans cette expérience, deux photons sont émis par un atome. Avant le passage dans le polariseur, les états de polarisation des deux photons sont indéterminés : ces états sont au mieux caractérisés par une superposition de deux états de polarisation, horizontal et vertical. Or, en supposant que le moment cinétique du système est nul, la conservation de celui-ci impose aux deux photons d'avoir des polarisations opposées. Dans le paradoxe EPR, cela impliquerait que la polarisation du second photon est connue, sans même la mesurer.

L'intrication quantique des deux photons réalisée par Alain Aspect a permis d'expliquer ce phénomène.

Einstein ne croyait pas à la non-localité. Pour lui deux particules qui se séparent, fussent-elles à quelques mètres et a fortiori à des milliards de kilomètres, conservent chacune leur propre identité et aucune information instantanée (c'est-à-dire allant plus vite que la vitesse de la lumière) ne peut aller de l'une à l'autre.

En 1964. Le physicien irlandais John Stewart Bell publia un article dans lequel il mit en évidence des effets quantitatifs et mesurables des expériences de type EPR. Ce sont les fameuses **inégalités de Bell** qui ont inspiré Alain Aspect.

Ces inégalités sont des relations quantitatives que doivent vérifier les corrélations de mesures entre systèmes qui respectent totalement la causalité relativiste. Si ces inégalités sont violées, alors il faut admettre des influences instantanées à distance.

Ces inégalités permettaient de lever un des deux obstacles à la réalisation d'expériences EPR. Mais en 1964, les moyens techniques étaient toujours insuffisants pour mettre en place concrètement ce type d'expérience.

L'expérience d'Alain Aspect (1980-1982)

Ce n'est que dans la période s'étalant de 1976 à 1983 que les chercheurs purent enfin disposer d'appareillages techniques suffisamment performants pour réaliser une expérience décisive.



Alain Aspect dans son laboratoire

C'est le français **Alain Aspect** qui, le premier, à l'Institut d'Optique d'Orsay, mit fin à cette controverse. Grâce à une technique *d'excitation à deux photons lasers*, efficace et sélective, il put obtenir une source très intense, parfaitement contrôlée et stabilisée. Le système de mesure de corrélations (détectations en coïncidence) mis au point permit d'obtenir des résultats sans ambiguïté. Les mesures furent réalisées en positionnant chaque polariseur à plus de 6 mètres de la source. On put alors détecter en coïncidence des événements séparés de moins de 10 nanosecondes, alors qu'un signal se propageant à la vitesse de la lumière aurait mis 40 nanosecondes pour aller d'un polariseur à l'autre.

Il en résulte que deux photons, même séparés par des milliers ou des milliards de kilomètres, restent en contact permanent, ils n'ont pas besoin d'échanger d'information à l'aide d'un moyen classique limité par la vitesse de la lumière (300 000 km/sec). Lorsque l'un est détecté, l'autre le sait instantanément. Ils

peuvent apparaître dans des directions opposées sans se consulter car ils forment un Tout inséparable, c'est le principe de non-séparabilité.

Autrement dit, si l'on prend deux particules qui ont interagi au moins une fois et que nous les séparons, même par des distances très grandes, à l'instant où nous effectuons une mesure sur l'une des deux particules, nous déterminons l'effondrement de la fonction d'onde qui en décrit l'état quantique (le spin), au même moment, la mesure sur la première particule influencera instantanément l'autre particule dont la fonction d'onde s'effondrera elle aussi. C'est comme si les particules intriquées n'étaient qu'une seule et même particule !

En 1997, le physicien suisse Nicolas Gisin réalisa avec succès une version de l'expérience d'Alain Aspect avec des détecteurs éloignés l'un de l'autre de onze kilomètres (D'autres chercheurs seraient parvenus à mettre en condition d'intrication non plus deux, mais cinq particules) !

Nicolas Gisin et son équipe réalisa la première expérience en dehors d'un laboratoire de physique. Pour cela, il utilisa le réseau de fibres optiques de l'opérateur national Swisscom. En effet, une fibre optique ininterrompue relie le centre de télécom de Cornavin au village de Bellevue, au nord de Genève et une autre jusqu'à Bernex, un village au sud de Genève distant de 11 kilomètres à vol d'oiseau de Bellevue ; dans ces villages ils installèrent des interféromètres et des détecteurs de photons (avec azote liquide). Les expériences de Gisin confirmèrent celles d'Alain Aspect.

Ces expériences suggèrent qu'à l'origine, toutes les particules dans l'histoire du cosmos ont interagi entre elles.

Autrement dit, tout dans notre environnement physique immédiat est fait de quanta qui ont interagi avec d'autres quanta, du big-bang à aujourd'hui.

L'intrication quantique croît de façon exponentielle avec le nombre des particules de l'état quantique originel : il n'existe aucune limite théorique au nombre de particules intriquées.

À son niveau de base fondamental, l'Univers est un vaste réseau de particules qui restent en contact sur n'importe quelle distance.

L'américain Brian Greene pense que l'Univers est un Tout intrinsèquement intriqué et cohérent, sans perte d'information. L'Univers resterait uni au-delà de

l'espace et du temps : nous existons tous dans une réalité holistique à l'instar de chaque chose qui vit sur Terre.

La mécanique quantique décrit et révèle donc d'étranges propriétés de la matière et de l'énergie à l'échelle de l'infiniment petit :

- **La cohérence quantique** : les particules sont unies en une entité collective décrite par une seule fonction d'onde.
- **La décohérence quantique** : Ce sont ces interactions qui provoquent la disparition rapide des états superposés. Seuls restent observables les états correspondant aux états observables macroscopiquement. La décohérence qui apparaît lorsqu'un objet quantique est couplé à son environnement joue un rôle essentiel dans les développements moderne de la théorie de la mesure.
- **L'intrication quantique non locale** où les états quantiques décrivant les particules séparées sont étroitement liés par une seule fonction d'onde,
- **La superposition quantique** où les particules existent en deux ou plusieurs états (ou lieux) simultanément,
- **L'effondrement quantique** d'un état décrit par une fonction d'onde donnée, où les particules qui se trouvent dans des états superposés sont sujettes à une réduction selon des choix bien spécifiques, déterminés par le processus de mesure.

Si la non-séparabilité est une caractéristique générale de l'Univers, l'Univers est un système holistique. Toutes les parties matérielles, y compris les atomes constitutifs de notre corps sont faites de particules quantiques qui ont interagi les unes les autres et ont formé des états non séparables. Il en découle qu'un être est entièrement ou fortement déterminé par le Tout dont il fait partie.

Edgard Mitchell, l'astronaute d'Apollo 14 qui avait marché sur la Lune, avait tenté une expérience sur la non-localisation de l'esprit qu'il décrit dans son livre « The way of the explorer » :

« Tous les soirs, alors que l'équipage se préparait à dormir et que tout devenait tranquille dans la cabine, je prenais le temps de sortir un carnet sur lequel j'avais copié une table de chiffres disposés dans un ordre aléatoire, ainsi que les cinq symboles de Zener : un carré, un cercle, une étoile, une croix et une ligne ondulante...Pendant ce temps, à des dizaines de milliers de kilomètres de là, en

Floride, mes collaborateurs essayaient de noter les signes dans le même ordre que moi » Les résultats obtenus s'écartant considérablement de ceux que le seul hasard aurait pu produire, indiquaient que l'information pouvait être partagée à distance.

La structure des êtres vivants reflète la structure de l'Univers et la spontanéité est l'absence de causalité.

Une information instantanée est-elle possible ?

L'intrication quantique ne peut être utilisée que pour obtenir des informations sur un composant d'un système quantique en mesurant l'autre composant tant que l'intrication reste intacte. Ce que l'on ne peut pas faire, c'est créer des informations à une extrémité d'un système intriqué et les envoyer d'une manière ou d'une autre à l'autre extrémité. Si l'on pouvait faire des copies identiques de l'état quantique, une communication plus rapide que la lumière serait possible, mais cela est interdit par les lois de la physique !

Las, aucune information ne peut être envoyée plus vite que la lumière, ce qui permet de maintenir la causalité pour notre Univers.

Applications de la découverte.

Cependant, la découverte de la non-localité n'est pas le résultat d'un jeu de l'esprit. Elle a déjà des applications bien concrètes en cryptographie (protection de données financières et médicales, conversations entre chefs d'État...) et en téléportation quantique, déjà réalisée par l'équipe de Nicolas Gisin, et qui ouvrent la voie à des applications innombrables !