

Des faits !

Le paradoxe EPR, les inégalités de Bell et la NON-séparabilité

• Introduction historique

En 1935, Einstein, qui fut par ailleurs **un des pionniers de la physique quantique** (\equiv PQ), et ses collaborateurs Podolski et Rosen émirent à l'encontre de cette théorie une objection importante concernant l'interprétation de Bohr, au travers du célèbre paradoxe dit "EPR". Pour eux, la PQ était correcte, mais *incomplète*. Dans une théorie *complète*, « chaque élément de la réalité physique possède une contrepartie dans la théorie physique ».

• Le paradoxe EPR¹ (1935)

Tout d'abord les auteurs posent un critère de réalité physique: « si, en ne perturbant aucunement un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique qui le caractérise, alors il existe un élément de la réalité qui correspond à cette grandeur ».

Puis ils considèrent un système composé de deux particules A et B qui ont interagi un certain temps avant de se séparer sans plus jamais interagir. La PQ décrit le système A+B par un *vecteur d'état* unique (cf. poster n°2). Si on mesure la quantité de mouvement de la particule A, avec le résultat p_A , le vecteur d'état permet de prédire avec certitude celle p_B de la particule B, sans aucunement la perturber; il doit donc exister un élément de réalité correspondant à p_B . De même, si on mesure la position de la particule A, avec le résultat q_A , on en tire q_B , auquel doit correspondre un autre élément de réalité.

Or p et q sont deux grandeurs conjuguées, que la PQ ne peut déterminer précisément simultanément: d'après le principe d'indétermination d'Heisenberg (cf. poster n°2), on a en effet $\Delta p \times \Delta q \geq h/4\pi$ ($h \equiv$ cst de Planck). Puisque ces éléments de la réalité n'ont pas de contrepartie dans la théorie, celle-ci est donc incomplète.

1. Extrait de [1] p. 45 ss.

Notre existence

• L'inégalité de John Bell (1964)

Mais il ne s'agissait que d'une expérience de pensée et Bohm en donna en 1951 une formulation plus réaliste qui s'appliquait à des protons. Bell montra en 1964 que, pour une telle expérience, les prévisions statistiques de la PQ pouvaient, dans certaines circonstances, différer de celles d'une théorie locale où l'on suppose l'existence d'une certaine variable cachée (postulée par Einstein pour compléter la PQ), et il établit une inégalité qui devait être en certains cas violée par la mécanique quantique. Le choix entre les interprétations de Bohr et d'Einstein devenait donc vérifiable expérimentalement.

• Les expériences d'Alain Aspect (1982) de Nicolas Gisin (1998)

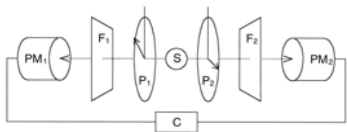


Fig. Dispositif de test EPR: S \equiv source, P \equiv polariseur, F \equiv filtre, PM \equiv photomultiplicateur, C \equiv compteur de coïncidence.

Les expériences avec des photons polarisés étant plus faciles à réaliser, une nouvelle forme de l'inégalité fut proposée. Dans ces expériences (cf. figure ci-contre), une source émet deux photons en cascade, par l'excitation d'un atome qui retourne à son état initial en passant par un état intermédiaire, dans un laps de temps très bref. Du fait de la conservation de la quantité de mouvement, les deux photons sont émis selon la même direction mais en sens opposés.

Pour détecter quelques-unes de ces paires de photons, on aligne de part et d'autre de la source deux polariseurs (dont on peut régler l'orientation), deux filtres (accordés à la fréquence de chacun des photons) et deux photomultiplicateurs (connectés à un compteur qui enregistre une coïncidence quand le deuxième photon est détecté très peu de temps après le premier). Toutes les expériences (en particulier les premières d'Aspect à Orsay ou les plus récentes de Gisin à GE) ont conclu à l'exactitude des prévisions quantiques (cf. [2] §7-10; [3] §1.12; [4] §2.2), bien que les appareils ne soient pas parfaits et que le circuit de coïncidence introduise une liaison entre les deux branches du dispositif.

Emergence d'un paradigme qui « réenchante » le monde.

Leur interprétation ?

• Explication "français courant" du phénomène²

Imaginons des jumeaux participant à un jeu télévisé. Installés dans deux cabines insonorisées, isolés l'un de l'autre, ils donnent exactement les mêmes réponses aux mêmes questions. On peut en déduire que les jumeaux ont les mêmes aptitudes et qu'ils ont acquis les mêmes connaissances durant leur vie. Mais alors que la coïncidence entre leurs réponses continue, une autre hypothèse peut venir à l'esprit: les jumeaux communiquent entre eux d'une façon ou d'une autre, comme s'ils étaient côte à côte.

Parmi les différents concepts impliqués dans le paradoxe EPR, la majorité des physiciens ont choisi de garder l'impossibilité de transmettre une information à une vitesse supérieure à la célérité de la lumière (postulat relativiste), et par conséquent, d'abandonner celui de localité. Ces expériences révèlent donc une propriété fondamentale de la nature, indépendamment de l'interprétation que l'on donne au formalisme quantique.

• Interprétations du phénomène²

Il y a en fait *deux* façons de considérer le phénomène: soit il s'agit d'une influence qui ne peut être véhiculée par de la matière ou de l'énergie (car sinon elle ne pourrait pas aller plus vite que la lumière) et qui s'exerce d'une particule sur l'autre: on parle alors de « non-localité » car elle viole le principe de localité tel que Einstein le concevait. Soit, comme le pensent une majorité de physiciens actuels, les deux particules *forment un seul et même objet* même lorsqu'on les mesure dans des instruments pouvant, en théorie, être séparés par des milliers de kilomètres. On parlera alors plutôt de « non-séparabilité » car les deux particules ne peuvent pas être séparées, tant qu'on n'a pas effectué de mesure sur elles (**décohérence** cf. [6] p. 154 ss).

2. Extrait de [0] p. 65 ss.

a-t-elle

un SENS?

• En guise de conclusion provisoire

On parle désormais d'**état intriqué** pour indiquer que des objets sont indissolublement enchevêtrés, qu'ils forment un objet unique quelle que soit leur distance de séparation.

Une paire de photons intriqués jumeaux des expériences précédentes n'est donc pas composée de deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un même ensemble de paramètres, mais doit en fait être considérée comme un système unique, inséparable, décrit par un état quantique global, impossible à décomposer en deux états relatifs à chacun des deux photons: les propriétés de la paire ne se résument pas à la réunion des propriétés des deux photons. Cette conclusion reste valable pour tout objet intriqué.

La portée de cette nouvelle révolution quantique est à la fois d'ordre théorique (cf. [3] §1.13; [5] p. 23 ss) et pratique (cf. [6] p. 158 ss). Le domaine de l'information quantique par exemple, vise à mettre en oeuvre ces concepts dans des applications étonnantes: d'une part de la *cryptographie quantique* qui est quasi opérationnelle (cf. [7]), et d'autre part du *calcul quantique* qui est encore dans une phase de recherche fondamentale, en attendant l'avènement du futur (?) **ordinateur quantique**.

• Pour aller plus loin

cf. compléments

- [1] J. Perdijon, "La Formation des idées en Physique" Dunod, 2007.
- [2] E. Klein, "Petit voyage dans le monde des quanta", coll. Champs, Ed. Flammarion, 2004.
- [3] H. Pagels, "L'univers quantique", InterEditions, 1985.
- [4] B. Hoffmann et M. Paty, "L'étrange histoire des quanta", coll. Points Sciences, Ed. Seuil, 1981.
- [5] B. d'Espagnat: collectif, "Science et quête de sens", Presses de la Renaissance, 2005.
- [6] A. Aspect et al., "Demain, la physique", Odile Jacob, 2004.
- [7] C. H. Bennett et al., "Cryptographie quantique", dossier n°36, Pour la Science, juillet-octobre 2002.
- [8] S. Ortolí et J.-P. Pharabod, "Le cantique des quantiques", La Découverte, 1984.

Groupe de branche de PHYSIQUE du LCC en collaboration avec le prof. Jean Staune

N°4 A suivre...

Complément 4a

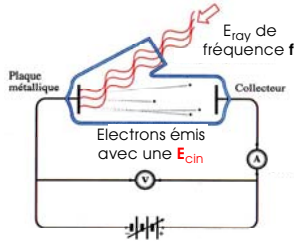
Einstein: un des pionniers de la Physique Quantique

Dans l'effet photoélectrique, certains métaux éclairés (E_{ray}) émettent des électrons quand la fréquence de la lumière " f " ($= c/\lambda$) est supérieure à un seuil " f_0 " donné. Le nombre d'électrons émis est proportionnel à l'intensité, comme on s'y attend. Par contre, l'énergie cinétique des électrons émis (E_{cin}) est indépendante de l'intensité lumineuse, mais dépend de la fréquence, ce qui est très surprenant. Ils sont émis sans délai (pas d'effet cumulatif). L'optique ondulatoire (du XIX^e siècle) est incapable d'expliquer ces propriétés.

Elargissant l'hypothèse de Planck, Einstein suppose qu'une lumière monochromatique est formée de petits paquets d'onde EM identiques: les photons. Chacun est porteur d'une énergie quantifiée " $E = h \cdot f$ ".

Si ce quantum d'énergie est supérieur à l'énergie " ϕ " nécessaire à l'extraction d'un électron, et dans ce cas uniquement, celui-ci est éjecté muni du solde d'énergie ($E_{\text{cin}} \equiv 1/2 mv^2$). La lumière est donc d'autant plus efficace que " λ " est petit. En obtenant expérimentalement les courbes linéaires prévues, Millikan valida cette hypothèse et confirma la valeur " h " introduite par Planck.

Découverte "fortuite" (Hertz 1887)

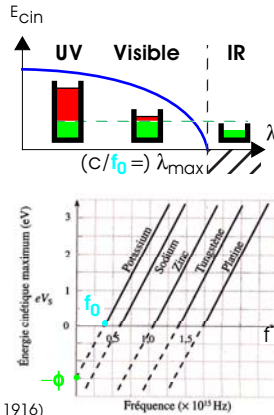


Explication théorique (Einstein 1905)

$$E_{\text{cin}} = h \cdot f - \phi_{\text{extraction}}$$

où f = fréquence du photon
 ϕ = E_{pot} d'extraction de l'électron

Vérification expérimentale (Millikan 1916)



Complément 4b

Du micro~ au macro~scopique: la décohérence quantique

Quid des superpositions cohérentes d'états?

L'une des propriétés spécifiques de la PQ est l'existence des *superpositions d'états*: si un système possède plusieurs états quantiques possibles, il peut non seulement se trouver dans l'un d'eux, mais il peut également se trouver dans un état hybride formé à partir de ces états de base. Les états intriqués sont de telles superpositions cohérentes, mais il existe des exemples beaucoup plus simples et pourtant très étonnants (cf. "2 fentes", poster 3).

Quelle est la clef du passage entre comportements "classique" et "quantique"?

Un tel comportement a effectivement été observé avec des objets microscopiques (électrons, photons, neutrons, atomes, molécules), ou mésoscopiques (courants électriques dans des nanocircuits), mais jamais avec des objets macroscopiques, alors que rien ne l'interdit a priori dans le formalisme quantique. Ce problème a attiré l'attention de nombreux physiciens, à commencer par Schrödinger qui en a donné une illustration amusante sous la forme du fameux chat qui pourrait à la fois être mort et vivant, ces deux états représentant un exemple frappant d'états incompatibles (cf. [1] §2.4.2; [2] §5; [3] §1.10).

Les physiciens invoquent généralement la *décohérence quantique* pour expliquer l'impossibilité d'une superposition cohérente d'états d'objets macroscopiques. La décohérence doit se manifester dès qu'un système quantique interagit avec le monde extérieur, par exemple lors d'une mesure. Or, plus un objet est complexe et gros et plus il est, en général, sensible aux perturbations extérieures.

Un virus est-il quantique?

Si ce raisonnement est séduisant, il est loin de clore le problème et de nombreuses questions restent posées. Une des plus troublantes est qu'on ne sait pas identifier une échelle au-delà de laquelle il deviendrait impossible d'éviter la décohérence.

Complément 4c

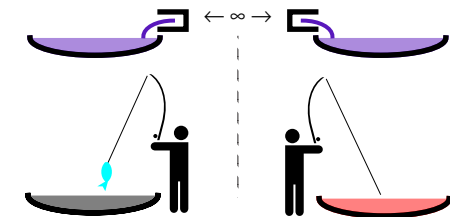
L'intrication quantique: l'analogie du pêcheur dans une mare boueuse

Contrairement à l'intuition et à ce qu'affirmaient les théories à variables cachées (même inobservable, un poisson se trouve toujours en un lieu précis), le formalisme quantique indique (cf. [8]) qu'il est comme dissout dans tout le liquide à disposition. Il ne se condense au bout de l'hameçon (décohérence), que lors de la prise (mesure). Lorsqu'une *truite* et une *perche* interagissent, elles forment une nouvelle *entité mélangée* (état intriqué) qui reste d'une certaine manière en contact quel que soit l'éloignement de ses parties.

Réalisation d'une superposition d'états, en mélangeant les 2 liquides poissonneux:



Séparation et transport de l'état intriqué dans 2 mares aussi éloignées que désiré:



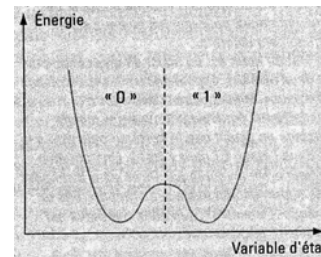
Si on pêche de manière aléatoire ! (ce point est essentiel, cf. ci-dessous) une "truite" dans l'une des mares, alors on pêchera **obligatoirement** une "perche" dans l'autre mare:

Cela semble contradictoire avec le principe de causalité relativiste qui spécifie qu'aucune interaction ne peut se propager plus vite que la lumière. En fait, il n'y a pas violation de la causalité, puisque la première mesure donne un résultat qui est parfaitement aléatoire, autrement dit ni influençable, ni même prévisible. Aucune information ne peut donc être transmise par ce moyen. Par contre en cryptographie quantique, cela permet de construire, puis de transmettre une clef de codage *intriquée*, de sécurité absolue.

Complément 4d

Le futur ordinateur quantique: « bit » classique et « qubit »

- Bit "classique" -

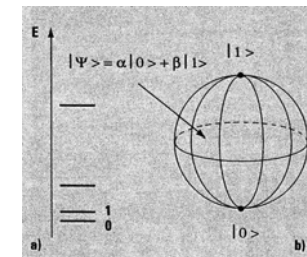


Un **bit classique** est fondé sur un système physique possédant deux états stables appelés "0" et "1". Ces deux états correspondent aux minima de l'énergie du système

Le **bit** est soit dans l'état "0", soit dans l'état "1". La présence de friction empêche les petites perturbations de changer l'état du système. L'information est écrite dans le système lors d'une grosse perturbation appliquée délibérément pour franchir la barrière de potentiel séparant les domaines du "0" et du "1".

L'information peut être relue fidèlement par la suite.

- Qubit "quantique" -



a/ Un **bit quantique** est fondé sur deux niveaux d'énergie d'un système adressable individuellement, le niveau fondamental "0" et le premier niveau excité "1". Le système doit être découplé aussi parfaitement que possible de l'environnement pour que les niveaux soient parfaitement discrets.

b/ L'état du **qubit** est un mélange quelconque de ces deux niveaux, appelé encore « superposition cohérente ». Nous pouvons décrire cette situation sans équivalent dans notre monde classique en disant que le système est à la fois dans l'état "0" ET dans l'état "1".

Lors d'une lecture de l'énergie, l'état se transforme irréversiblement en "0" OU "1" (*décohérence*). La probabilité de trouver "0" ou "1" dépend de la « latitude » de l'état initial. (A. Aspect et al., "Demain, la physique", Odile Jacob, 2004, p. 160 ss.)