

cette future génération d'ordinateurs, pourraient aussi être la clé pour construire un «internet quantique» hautement sécurisé.

Le concept d'internet quantique recouvre de nombreux dispositifs et idées, dont le développement est un défi à la fois technologique et théorique (voir l'entretien avec Nicolas Gisin, pages 22 à 27). En particulier, la propriété importante qui nous intéresse ici et qui se manifeste dans les systèmes quantiques, des plus simples manipulant juste des paires de photons (les particules élémentaires de lumière) aux plus complexes tels que l'internet quantique, est celle de la non-localité. Et si la physique quantique a la réputation d'être contre-intuitive, c'est surtout en raison de son caractère non local.

UN PRINCIPE ÉVIDENT ?

Pour comprendre cette non-localité, rappelons ce qu'est le principe de localité. D'après celui-ci, toute information ou influence se propage continûment, de proche en proche, à une vitesse finie inférieure ou égale à celle de la lumière, en vertu des lois de la théorie de la relativité restreinte. Le principe de localité semble *a priori* évident pour notre intuition, forgée à partir de notre expérience du monde classique et macroscopique. Pourtant, il n'en est rien à l'échelle microscopique.

Pour être plus précis, le principe de localité ne s'accorde pas avec la physique quantique si l'on admet une hypothèse, celle de l'indépendance du choix de la mesure. Selon cette hypothèse, il est possible de choisir la façon de mesurer un système indépendamment du système lui-même, et il n'existe pas une cause qui soit à la fois à l'origine du choix de cette façon de mesurer et à l'origine de l'état du système (voir l'encadré page ci-contre).

En passant du monde macroscopique à l'univers microscopique et quantique, certains des principes fondamentaux de la physique classique ne s'appliquent plus et doivent être abandonnés. Imaginons un détective armé de son intuition «classique». Il serait bien en peine de percer à jour certaines énigmes du monde microscopique. Il serait confronté à des situations où, par exemple, raisonner simultanément sur la position et la vitesse d'un suspect au moment du crime n'a pas de sens, où l'auteur du crime pourrait être à deux endroits en même temps et où la victime pourrait être à la fois morte et vivante !

Depuis la naissance de la mécanique quantique il y a presque un siècle, les physiciens ont démontré expérimentalement la solidité de cette théorie. Bien que les lois quantiques heurtent l'intuition, ils ont appris à se forger une «intuition quantique» qui leur permet d'en être familiers et de mieux les comprendre. La non-localité quantique a ainsi une histoire riche, ponctuée de débats, de percées théoriques et

d'expériences de pointe. Les physiciens ont mis à l'épreuve leurs idées à ce sujet dans des expériences faisant appel à des sources émettant deux ou trois photons. Or les résultats de ces tests ne pouvaient s'expliquer qu'en remettant en cause le principe de localité (ou alors, celui de l'indépendance du choix de la mesure).

Si l'on peut dire aujourd'hui que la non-localité dans les expériences impliquant une source unique de photons est bien comprise, l'internet quantique bouleverse cette notion. En effet, concevoir un réseau pour l'internet quantique n'est possible qu'en introduisant de multiples sources indépendantes de photons. Le fait de passer d'une source unique à deux sources, trois, etc., change complètement l'analyse du système et la façon dont la non-localité se manifeste.

Depuis une dizaine d'années, alors que l'intérêt pour l'internet quantique grandit, les physiciens théoriciens se sont aussi penchés sur ces systèmes à plusieurs sources de photons. Ils commencent seulement à entrevoir la façon de repenser la notion de non-localité. La formulation de cette dernière ne serait pas unique, mais dépendrait du contexte où elle se manifeste. À terme, une compréhension plus fine des subtilités de la non-localité en réseau débouchera certainement sur de nouvelles applications, voire contribuera à améliorer l'internet de demain.



L'internet quantique bouleverse la notion de non-localité



Pour saisir les enjeux de la non-localité quantique, il est nécessaire de comprendre comment les physiciens sont parvenus à appréhender progressivement cette notion au cours des cent dernières années.

Très tôt dans l'exploration des fondements de la mécanique quantique, les physiciens ont rencontré des difficultés à penser et à formuler cette situation paradoxale. Comment deux principes qui semblaient évidents pour les scientifiques du début du xx^e siècle (la localité et l'indépendance du choix de la mesure) pouvaient-ils être incompatibles avec la physique quantique ? Dans les années 1930, Albert Einstein et deux collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen, ont lancé le débat dans un article resté célèbre, qui s'étonnait d'une «mystérieuse action à distance» incluse dans le

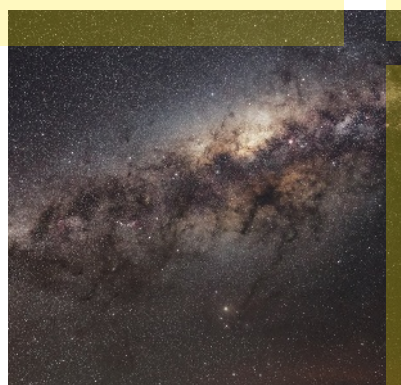
CHOIX DE MESURE INDÉPENDANTS ET SUPERDÉTERMINISME

Dans les expériences de physique quantique de type tests de Bell, comme l'expérience GHZ, les chercheurs obtiennent des corrélations entre les résultats de mesures choisies et effectuées en plusieurs points de l'espace, corrélations inexplicables si l'on admet le principe de localité et celui de l'indépendance du choix des mesures.

Les choix de mesures reposent sur une composante aléatoire, comme un tirage à pile ou face. On pourrait rétorquer qu'après tout, un résultat de lancer de pièce n'est pas aléatoire : il dépend de la façon de lancer, des mouvements d'air autour de la pièce, etc. Une façon d'expliquer les corrélations en conservant le principe de localité serait alors de révoquer le principe de l'indépendance du choix de la mesure. Mais cela n'est pas si simple. Même si les tirages à pile ou face réalisés pour choisir les mesures sont déterminés par certaines causes, il faudrait, pour expliquer l'expérience GHZ, que ces causes conspirent de façon « intelligente » pour reproduire le résultat prévu par la physique quantique. Dans l'expérience GHZ transposée aux chats et décrite par les auteurs, il faudrait qu'une cause commune détermine à la fois les chats qui entrent dans les détecteurs de l'expérience et les résultats des tirages à pile ou face, de telle façon que les

résultats des mesures effectuées soient exactement conformes aux prédictions de la théorie. On parle alors d'explication « superdéterministe ». Pour expliquer les expériences de Bell, ce « déterminisme intelligent » doit être finement réglé à travers tout l'Univers pour ne pas être mis en défaut.

Concrètement, les expériences de Bell actuelles utilisent des générateurs de nombres aléatoires en tirant leur aléa de sources aussi variées que des fluctuations dans la lumière émise par des lasers, le rayonnement émis par des quasars il y a des milliards d'années, les bits issus de la numérisation de vieux films hollywoodiens, les décimales de π ...



Dans le cadre superdéterministe, pour expliquer ces expériences, il faudrait ainsi prétendre qu'il existe un lien entre elles et le réalisateur Martin Scorsese ou la lumière des quasars ! Cette vision « conspirationniste » de la physique amène très rapidement à affirmer que « tout est écrit à l'avance ». Or une telle affirmation n'est pas réfutable, donc sort du cadre de la science, et l'on peut se demander quel sens donner aux lois physiques si tout est déjà écrit. La plupart des physiciens refusent cette piste ; ils admettent, de façon implicite, le principe de l'indépendance du choix de la mesure, ou plus exactement d'une expérience non superdéterministe.

En 2017, dans leur expérience de Bell, au lieu de tirer à pile ou face avec des pièces, l'équipe d'Anton Zeilinger, de l'université de Vienne, a utilisé la lumière de deux étoiles distantes de plus de 500 années-lumière : les chercheurs effectuaient un type de mesure ou un autre selon que la fréquence des photons issus des astres était supérieure ou inférieure à une valeur donnée. Selon le superdéterminisme, certaines causes auraient réglé finement les émissions lumineuses des deux étoiles il y a plus de 500 ans pour que les résultats de l'expérience de physique soient compatibles avec les prédictions de la physique quantique. En utilisant des quasars, on pourrait repousser cette logique à plusieurs milliards d'années...

formalisme de la mécanique quantique. Les trois chercheurs ont démontré que, selon ce formalisme, un événement survenant à un endroit peut avoir une influence instantanée sur la description mathématique d'un autre système physique, à distance, ce qui semble être en contradiction avec le principe de localité (qui n'était pas encore conceptualisé dans sa formulation moderne).

Pour Einstein et ses collègues, cette conclusion était le signe que la théorie quantique était incomplète, et qu'il devait exister une théorie alternative conduisant aux mêmes prédictions, mais en évitant ce paradoxe apparent. Cependant, pour le physicien danois Niels Bohr, l'un des principaux fondateurs de la mécanique quantique, il fallait accepter cette étrangeté dans le formalisme de la théorie quantique, qui ne débouchait sur aucune contradiction en pratique.

Pendant plusieurs décennies, aucun argument théorique ni aucune expérience n'ont permis de résoudre cette controverse, mise de côté par la plupart des physiciens puisqu'elle n'affectait pas leurs travaux au quotidien. En 1964, le Nord-Irlandais John Bell a fait progresser la situation de façon cruciale. Alors qu'il cherchait une théorie qui réconcilierait

les prédictions de la physique quantique et ce que nous nommons maintenant la localité, il a démontré un résultat exactement opposé, qui a mené à l'un des théorèmes de physique fondamentale les plus importants, révolutionnant notre vision du monde. Reformulé dans la décennie suivante, ce théorème prouve qu'aucune théorie conduisant aux mêmes prédictions que la physique quantique ne peut être compatible à la fois avec le principe de localité et avec celui de l'indépendance du choix de la mesure. Ce théorème a ouvert la voie à des tests concrets, dits « expériences de Bell », qui mettent en défaut la conjonction de ces deux principes.

En réalité, il existe de nombreuses expériences de Bell. Celle discutée à l'origine par Bell est une expérience de pensée, sans indications sur la façon de la réaliser en pratique, avec les moyens techniques de l'époque. Elle est aujourd'hui connue sous le nom d'expérience CHSH, du nom des physiciens américains John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony et Richard Holt qui en proposèrent la première procédure expérimentale. Elle met en jeu deux expérimentateurs effectuant des mesures en deux lieux distincts. Elle a l'avantage d'être relativement simple à réaliser.