

Physique



Vue d'ensemble de l'expérience. Les deux diamants fournissant des systèmes intriqués sont situés dans des locaux distants (taches jaunes, à gauche et en haut à droite).

Une expérience de Bell sans faille

L'existence de l'intrication et de la non-localité quantiques a été testée de nombreuses fois. Mais jusqu'à présent, tous les dispositifs souffraient de failles subtiles. Une nouvelle expérience évite ces écueils.

Albert Einstein est connu pour avoir émis de nombreuses objections à la physique quantique, en particulier à une de ses prédictions, l'intrication quantique. En 1935, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il a formulé ses critiques sous la forme d'un paradoxe, le paradoxe EPR. Selon ces trois physiciens, l'intrication quantique de deux particules impliquait l'existence d'une interaction se propageant plus vite que la lumière. Pour éviter le conflit avec la théorie de la relativité restreinte, il faut alors supposer que la physique quantique décrit la réalité de façon incomplète et qu'il existe des variables cachées, inconnues des physiciens, qui donnent l'illusion de l'intrication quantique.

Le physicien danois Niels Bohr, lui, ne pensait pas qu'il y avait conflit avec la relativité restreinte. Selon lui, l'intrication quantique est un phénomène non local : il ne dépend pas des positions des particules dans l'espace. Un système intriqué forme un tout dont on ne peut pas décrire séparément les composants.

Des expériences ont été conçues pour confirmer la non-localité de l'intrication, mais toutes présentent des failles,

ou échappatoires. Une équipe menée par Ronald Hanson, de l'université de Delft, aux Pays-Bas, a conçu une nouvelle expérience sans faille.

L'intrication quantique lie l'état de deux particules ou plus, même si elles sont très éloignées les unes des autres. Prenons un système intriqué de deux particules dont les spins (leurs moments cinétiques intrinsèques) sont toujours opposés. Lorsqu'on mesure le spin d'une des particules, le résultat est aléatoire (une orientation ou l'autre). Mais instantanément, le spin de la seconde particule prend l'orientation opposée, même si les particules sont trop éloignées l'une de l'autre pour avoir le temps d'échanger une information (à la vitesse de la lumière au plus).

Le débat lancé par Einstein et Bohr a peu évolué jusqu'en 1964, lorsque le physicien nord-irlandais John Bell propose un principe d'expérience pour trancher la question. Il établit des inégalités, dites de Bell, qui sont évaluées au cours de l'expérience. Si les inégalités sont violées, alors l'hypothèse des variables cachées sera exclue ; il faudra se résoudre à admettre le caractère non local de la nature.

En 1982, l'équipe d'Alain Aspect, de l'Institut d'optique à

Orsay, met au point une expérience pour vérifier les inégalités de Bell. Elle fait appel à une source de paires de photons intriqués dont on mesure la polarisation avec deux instruments assez éloignés l'un de l'autre pour éviter l'« échappatoire de communication » (ou échappatoire de localité), c'est-à-dire une communication à la vitesse de la lumière entre les photons intriqués.

L'équipe d'Alain Aspect a montré que les inégalités de Bell sont violées, ce qui confirmait le caractère non local de la physique quantique. Cependant, cette conclusion nécessite de faire une hypothèse, car cette expérience souffre d'une « échappatoire de détection ». En effet, les photons sont facilement absorbés et tous ne sont pas détectés. On peut imaginer que les photons détectés violent artificiellement les inégalités de Bell, ce qui ne serait pas le cas de l'ensemble des photons. Pour que l'expérience d'Alain Aspect soit concluante, il faut supposer que l'échantillon constitué par les photons intriqués détectés est représentatif.

Ronald Hanson et son équipe ont mis au point un système qui traite les deux failles en même temps. L'idée avait déjà été

suggérée par Bell. Il faut un sous-système qui assure que le dispositif quantique est prêt à être mesuré.

L'expérience comprend deux diamants – distants de près de 1,3 kilomètre –, qui présentent des défauts dans le réseau cristallin. Ces défauts constituent des systèmes quantiques individuels dotés chacun d'un spin électronique. Les physiciens forcent les diamants à émettre des photons intriqués avec l'état de spin du défaut. Ces photons sont guidés vers un dispositif placé entre les deux sites initiaux afin d'être détectés. La mesure de ces photons transforme (instantanément) leur intrication avec les spins des défauts en une intrication entre ces spins et assure que cette nouvelle intrication est prête à être mesurée. L'échappatoire de détection est fermée dans l'expérience, car les spins sont mesurés à chaque fois. Ces mesures sont effectuées en moins de 4 microsecondes pour empêcher l'échappatoire de communication. Les physiciens ont étudié 245 paires de spins de défauts dans cette expérience et ont alors montré que les inégalités de Bell étaient violées. La physique quantique est bien non locale.

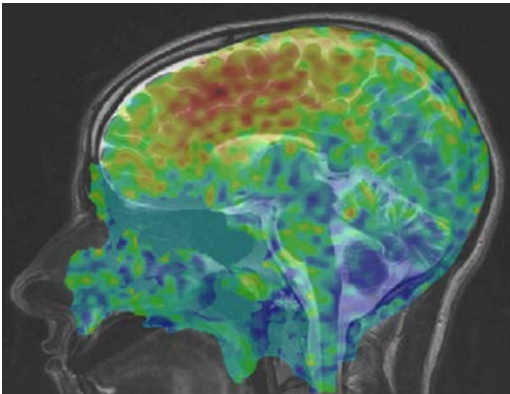
S. B.

Nature, en ligne le 21 octobre 2015

Neurosciences

Palper virtuellement le cerveau

Une nouvelle méthode d'imagerie se révèle capable de localiser des zones plus ou moins dures dans le cerveau. Elle pourrait être utile pour détecter des tumeurs ou les maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer.



En mesurant les vibrations naturelles du cerveau par IRM et en déterminant leurs longueurs d'onde (*croissantes du bleu au rouge*), les chercheurs calculent l'élasticité des tissus, susceptible de trahir la présence de certaines maladies.



© Inserm/Stefan Catheline

1
millimètre

C'est l'amplitude maximale
des vibrations naturelles
créées par la circulation
du sang et du liquide
céphalorachidien
dans le cerveau

Est-ce le début de la sismologie cérébrale ? C'est en tout cas des techniques des sismologues que s'est inspirée l'équipe de Stefan Catheline, de l'Inserm, pour élaborer une nouvelle méthode d'imagerie, qui vise à mesurer les variations d'élasticité dans le cerveau.

Ces informations, habituellement recueillies par palpation dans les autres régions du corps, sont précieuses pour le diagnostic de diverses maladies. La palpation permet par exemple de repérer des zones plus dures qui correspondent à des tumeurs. Depuis le début des années 2000, des méthodes virtuelles sont disponibles. Le principe est de créer une petite vibration à la surface de la peau et d'analyser sa propagation par des techniques d'imagerie. On remonte ainsi aux propriétés mécaniques des différents tissus.

Ces méthodes sont cependant difficiles à appliquer au cerveau, isolé de l'extérieur par le crâne et le liquide céphalorachidien. On y parvient tout de même, mais avec une faible précision et au

prix de vibrations assez fortes, qui véhiculent une grande énergie acoustique. De ce fait, la technique n'est pas utilisée pour des examens cliniques de routine.

Les chercheurs se sont alors inspirés des sismologues, qui savent depuis peu reconstruire les propriétés des profondeurs terrestres en analysant le bruit sismique. Ce dernier résulte des innombrables sources qui font faiblement vibrer le sol, tel le choc des vagues sur la côte. Le cerveau aussi est agité d'un bruit sismique, car la pulsation du sang dans les artères et la circulation du liquide céphalorachidien y créent de multiples vibrations.

Les auteurs de l'étude ont partiellement reconstitué ces vibrations en prenant une image de l'intérieur du cerveau toutes les secondes et demie, grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ils ont ensuite calculé l'élasticité des zones traversées par les « ondes sismiques cérébrales » grâce aux algorithmes utilisés en sismologie.

Les chercheurs ont d'abord validé leur méthode sur un matériau d'élasticité connue, puis chez deux volontaires humains. À quelques exceptions près, ils ont obtenu des valeurs en accord avec les techniques fondées sur des vibreurs. Cependant, de nombreux essais précliniques et cliniques sont encore nécessaires pour prouver l'efficacité de la méthode.

Selon Stefan Catheline, la résolution est déjà suffisante pour le diagnostic de diverses maladies. « La maladie d'Alzheimer, la sclérose en plaques et les tumeurs impliquent des changements dans la dureté des tissus cérébraux », explique-t-il. Les caractéristiques de ces changements restent à préciser, car peu d'études ont mesuré ce paramètre dans le cerveau, mais les « vibrations inexploitées qui emplissent les tissus vivants », selon les termes des chercheurs, sont déjà pleines de promesses.

G. J.

A. Zargani et al., PNAS, en ligne le 5 octobre 2015