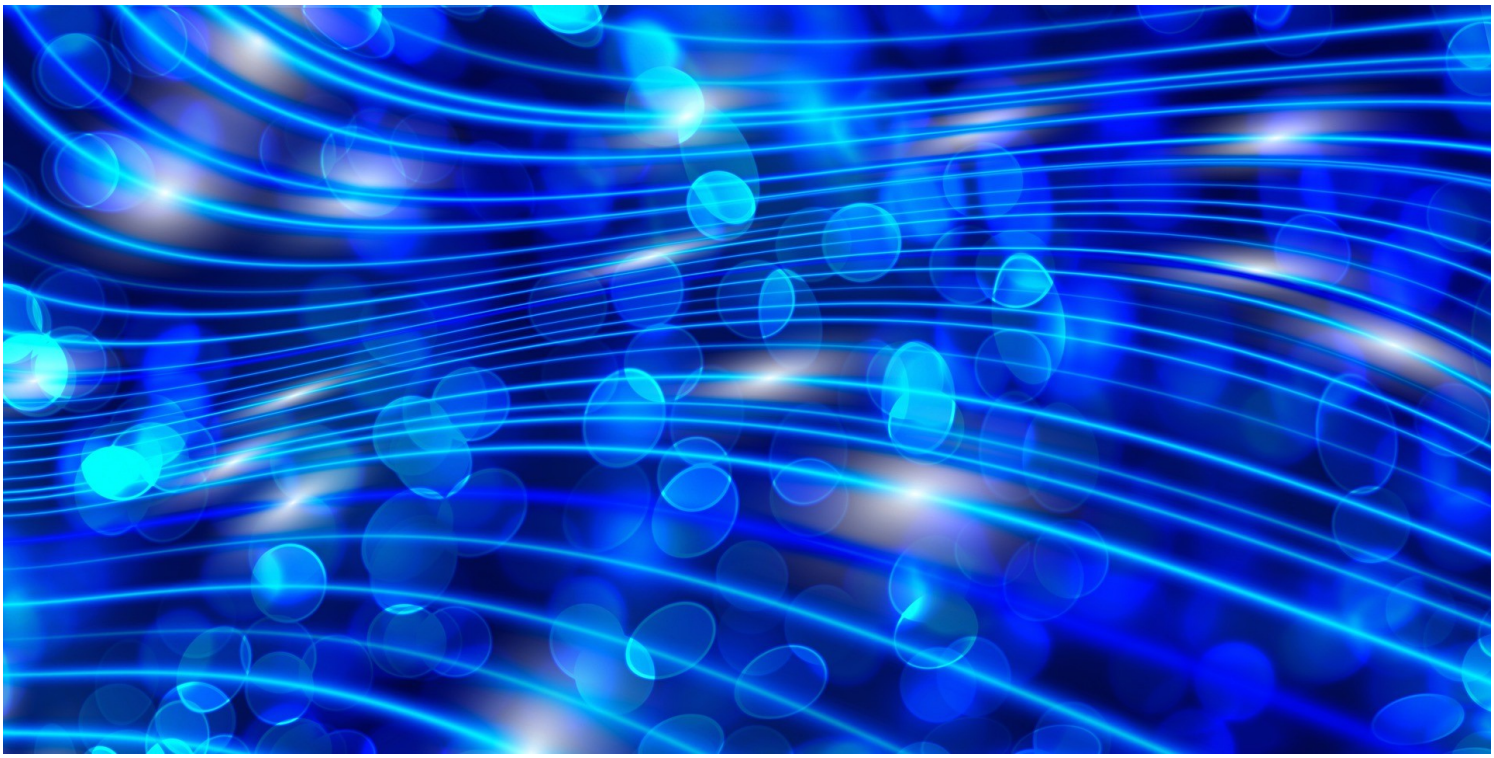
DAILY SCIENCE
DÉCOUVREZ LA SCIENCE, LA RECHERCHE ET L'INNOVATION "MADE IN BELGIUM"

DES VARIABLES DÉLOCALISÉES DANS LE TEMPS ALLANT À L'ENCONTRE DES INÉGALITÉS CAUSALES

Publié le 27 avril 2023



par Daily Science

Une équipe de chercheurs du "Centre for Quantum Information and Communication" de l'Université libre de Bruxelles et du Centre National français de la Recherche Scientifique a montré pour la première fois qu'un type exotique de processus violant les inégalités de causalité peut être réalisé en accord avec les lois de la physique telles qu'on les connaît. La violation d'une inégalité causale prouve, sous des hypothèses indépendantes de la théorie considérée, que certaines variables d'une expérience ne peuvent pas être classées dans un ordre causal bien défini.

Il s'agit d'un phénomène dont on savait qu'il était possible en théorie, mais dont on pensait généralement qu'il était impossible en pratique, du moins dans les régimes connus de la physique. La nouvelle étude montre que de tels processus peuvent en fait être réalisés selon la mécanique quantique standard, en considérant des variables délocalisées dans le temps. Cette découverte pourrait avoir de fortes implications pour notre compréhension de la causalité en physique.

Concept de causalité

Le concept de causalité est essentiel pour la physique et pour notre compréhension du monde en général. Habituellement, nous considérons que les événements se produisent dans un ordre causal bien défini. En d'autres termes, ils sont ordonnés en fonction d'un paramètre temporel, de sorte que les événements passés peuvent influencer les événements futurs, mais pas l'inverse.

Par exemple, le lever du soleil provoque le chant du coq, mais le fait que le coq chante ou non n'a aucune influence sur le lever du soleil.

Inégalités causales

Ces dernières années, la question de savoir ce qu'il advient de cette notion conventionnelle de causalité lorsque la théorie quantique entre en jeu a suscité un intérêt croissant. L'un des principaux résultats dans ce nouveau domaine a été la découverte de processus hypothétiques qui peuvent produire des corrélations violant ce que l'on appelle les inégalités causales.

Cela impliquerait l'absence d'ordre causal entre certaines variables dans une expérience, de manière similaire à la façon dont la violation des inégalités de Bell implique qu'aucun modèle local de variable cachée ne peut expliquer les observations.

Mais si la violation d'une inégalité de Bell exclut les explications causales classiques de certaines corrélations, les variables observées dans une expérience de Bell respectent toujours la structure causale de l'espace-temps en ce sens qu'elles ne permettent pas de s'influencer mutuellement plus rapidement que la lumière. La violation d'une inégalité causale, en revanche, implique que certaines variables observées ne peuvent en principe pas être ordonnées causalement, puisque certaines de ces variables sont en quelque sorte à la fois dans le passé causal et dans le futur causal l'une de l'autre.

Violation des inégalités causales

Malgré des progrès significatifs dans ce domaine de recherche, la question de savoir si les processus violant les inégalités causales peuvent être réalisés dans les régimes de la physique connue est restée un problème central ouvert.

Bien que certains processus causalement indéfinis soient connus pour admettre des implémentations expérimentales en conditionnant le temps de réalisation des différents événements par des variables quantiques en superpositions, ces processus ne peuvent pas violer les inégalités causales, qui sont une forme beaucoup plus forte, et indépendante de la théorie, de l'indétermination causale.

En raison de leurs propriétés hautement contre-intuitives, les processus violant les inégalités causales étaient généralement considérés comme impossibles avec la physique telle qu'on la connaît.

Sous-systèmes délocalisés dans le temps

Julian Wechs et Ognyan Oreshkov, chercheurs F.R.S.-FNRS à l'Université libre de Bruxelles, et Cyril Branciard, chercheur CNRS à l'Institut Néel de Grenoble, ont montré que certains processus violant les inégalités causales peuvent en fait être réalisés dans les régimes de la physique quantique standard, sur ce que l'on appelle des sous-systèmes délocalisés dans le temps.

Il s'agit de systèmes physiques définis par des observables qui sont délocalisés à différents instants du temps, de la même manière que l'information quantique peut être délocalisée dans l'espace, par exemple dans les codes correcteurs d'erreurs quantiques. Le concept a été introduit pour asseoir sur des bases rigoureuses l'affirmation selon laquelle les précédentes mises en œuvre expérimentales de processus causalement indéfinis constituent de véritables réalisations du concept théorique.

Les chercheurs ont maintenant trouvé une nouvelle façon de délocaliser les sous-systèmes qui rend possible la mise en œuvre d'une classe inattendue de processus causalement indéfinis, dont certains exemples très frappants qui violent les inégalités causales. Ils ont décrit une réalisation potentielle de l'un des processus les plus contre-intuitifs connus - le processus dit de Lugano, découvert par Mateus Araújo, Adrien Feix, Ämin Baumeler et Stefan Wolf - qui est, étonnamment, classique et déterministe, décrivant des dépendances causales cycliques entre trois parties, semblables à celles attendues dans des courbes temporelles fermées.

« Cette possibilité est obtenue grâce à une nouvelle façon de délocaliser les opérations quantiques ou classiques. Les résultats donnent l'impression qu'Alice et Bob peuvent faire des choix qui influencent le fait qu'une action spécifique effectuée une fois par Charlie ait lieu dans leur passé ou dans leur futur. Il s'agit manifestement d'une violation de la causalité, puisqu'ils ne devraient pas être en mesure d'influencer le fait que Charlie a fait quelque chose dans leur passé ou non. La "solution" à ce paradoxe apparent est que l'opération de Charlie ne se produit ni dans le passé ni dans le futur - elle se produit de manière délocalisée sur les deux temps possibles », explique Julian Wechs.

« Il est vraiment incroyable que ce type de situation soit possible dans la pratique, même avec des variables délocalisées dans le temps. Maintenant que nous avons vu à quoi ressemblent ces variables, il semble rétrospectivement peu surprenant que nous puissions définir des variables délocalisées à différents moments, de telle sorte qu'elles ne puissent effectivement pas être localisées en fonction d'autres variables. Mais si vous m'aviez demandé il y a trois ans si je pensais que les processus violant les inégalités causales pouvaient être réalisés en termes de telles variables, j'aurais probablement répondu par la négative », ajoute Cyril Branciard.

« Ce que je trouve vraiment frappant, c'est que cette violation de l'inégalité causale concerne des variables entièrement classiques », déclare Ognyan Oreshkov. « Nous savions depuis un certain temps que, du moins en théorie, les corrélations non causales ne sont pas un phénomène exclusivement quantique lorsqu'il y a plus de deux parties. Mais le fait que cela puisse se produire en pratique nous oblige vraiment à reconsidérer nos présomptions quant au type de relations causales possibles dans la nature. Et lorsque les superpositions quantiques sont prises en compte, l'éventail des possibilités s'élargit encore. »

Les conséquences de ce résultat pour notre compréhension du temps restent à élucider. Peut-il y avoir des observateurs pour lesquels le temps s'écoule d'une manière qui correspondrait aux relations causales cycliques dans ce type de processus, et cela pourrait-il donner des indications sur le comportement de l'espace-temps dans des régimes où la théorie quantique et la relativité générale deviennent toutes deux pertinentes ? Au-delà de son importance pour la physique fondamentale, les chercheurs espèrent que ce résultat pourrait donner lieu à de nouvelles applications dans le traitement de l'information qui exploiteraient des variables délocalisées dans le temps.