

La source quantique de l'espace-temps

Publié par : Jacqueline Charpentier Date: 18 novembre 2015 Heure :9:48 dans Science

De nombreux physiciens pensent que l'intrication est l'essence de l'étrangeté quantique et certains d'entre eux suggèrent désormais que l'intrication pourrait être aussi la source de la géométrie de l'espace-temps.



Au début de 2009, armé de son audace, d'un esprit ouvert et d'un congé sabbatique, *Mark Van Raamsdonk* a décidé de s'attaquer à l'un des plus grands mystères de la physique : La relation entre la mécanique quantique et la gravitation (*il s'était levé du bon pied*). Après un an de travail et des consultations avec ses collègues, il a envoyé son papier à la revue *High Energy Physics*. En avril 2010, la revue a rejeté son article et l'évaluateur, dans son jugement, a estimé que Mark Van Raamsdonk devait arrêter de fumer du cannabis avant d'écrire un papier scientifique. Sa prochaine publication, pour la revue *General Relativity and Gravitation*, n'a pas fait mieux et l'évaluateur a été très cinglant (*pour ne pas être vulgaire*) et le rédacteur en chef de la revue a demandé une réécriture complète de son papier.

Par la suite, Van Raamsdonk a proposé une version courte de son papier pour un concours annuel d'essais organisé par la *Gravity Research Foundation* au Massachusetts. Non seulement, il a gagné le premier prix, mais il a aussi savouré son ironie. Sa victoire lui garantissait une publication dans la revue *General Relativity and Gravitation* qui a publié son article en juin 2010.

Mais les rédacteurs en chef avaient de bonnes raisons d'être prudents. Le papier de Mark Van Raamsdonk concernait ***l'unification de la mécanique quantique et de la gravitation et c'est un problème qui échappe aux physiciens depuis près de 100 ans***. La mécanique quantique gouverne le monde de l'infiniment petit où une particule ou un atome peut se trouver dans de nombreux endroits au même moment. Et cette particule ou atome peut pivoter (*Spin*) dans ou contre le sens des aiguilles d'une montre. La gravitation gouverne le monde de l'infiniment grand allant de la chute d'une personne jusqu'au mouvement des planètes, des étoiles et des galaxies. La gravitation est décrite par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein qui fête ses 100 ans ce mois. Cette théorie stipule que la gravitation est de la géométrie. Les particules sont déviées lorsqu'elles passent à côté d'un objet massif et ce n'est pas à cause d'une force quelconque, mais parce que l'espace et le temps, autour de l'objet, sont déformés.

Les 2 théories ont été vérifiées par d'innombrables expériences, mais les réalités qu'elles décrivent sont incompatibles. Et du point de vue des rédacteurs en chef, la solution de Van Raamsdonk était pour le moins étrange. Van Raamsdonk estime qu'on a seulement besoin de l'intrication qui est le phénomène ultime de l'étrangeté quantique. Une intrication permet la mesure d'une particule de manière instantanée pour déterminer l'état d'une autre particule associée et c'est valable quel que soit la distance. Vous pouvez mettre 2 particules à chaque extrémité de la Voie lactée, mais l'intrication quantique sera toujours valable.

Einstein répugnait sur l'idée de l'intrication qu'il considérait comme une action terrifiante à distance (*spooky action*). Mais l'intrication est le pilier central de la théorie quantique. Et Van Raamsdonk, qui se base sur des travaux de physiciens datant de plus d'une décennie, argue qu'en dépit des objections d'Einstein, ***l'intrication pourrait la base de la géométrie et par conséquent, que l'intrication est la base de la théorie de la gravitation/géométrie d'Einstein***. Selon Van Raamsdonk, *l'espace-temps est seulement la structure géométrique sur la manière dont le système quantique est intriqué*.

Cette idée est loin d'être prouvée et ne complète pas la gravité quantique. Mais des études indépendantes ont atteint la même conclusion et cela suscite un intérêt intense chez de nombreux théoriciens. Une petite communauté de physiciens travaille désormais pour étendre la relation entre l'intrication et la géométrie en utilisant les outils modernes pour l'informatique quantique et la théorie quantique de l'information.

Je n'hésiterais pas une minute selon le physicien Bartłomiej Czech de l'université de Stanford en disant que les connexions entre la théorie quantique et la gravitation, qui ont émergé depuis les 10 dernières années, sont révolutionnaires.

La gravitation sans la gravitation

Une grande partie de ces travaux se base sur une découverte du physicien *Juan Maldacena* en 1997. La recherche de Maldacena l'a mené à considérer la relation entre 2 modèles de l'univers. Le premier est un cosmos similaire au nôtre. Même s'il ne s'étend pas ou ne se contracte pas (*contrairement à notre vrai univers*), il possède 3 dimensions, il est rempli avec des particules quantiques et il obéit aux équations de la gravitation d'Einstein. On le connaît comme l'espace *anti-de Sitter* même si on le surnomme simplement la **bulle**. Le second modèle de l'univers est également rempli avec des particules quantiques, mais il possède seulement 2 dimensions et il ne possède pas de gravitation. Connue comme la **frontière**, c'est une membrane définie mathématiquement qui s'étend sur une distance infinie à partir de n'importe quel point dans la bulle, mais cette frontière ne le couvre pas totalement. *On peut l'illustrer comme une surface 2D d'un ballon qui couvrirait un volume 3D composé d'air*. Les particules de la frontière obéissent aux équations d'un système quantique connu comme la *Théorie conforme des champs (TCC)*.

Maldacena a découvert que la frontière et la bulle sont totalement équivalentes. Un peu comme les circuits 2D d'un processeur qui encodent l'imagerie 3D d'un jeu vidéo. Les équations, relativement simples de la frontière et qui n'incluent pas la gravitation, contiennent la même information et décrivent les mêmes physiques que les équations qui règnent dans la bulle. *C'est comme un miracle selon Van Raamsdonk. Soudainement, la dualité de Maldacena a permis aux physiciens de penser à la gravité quantique dans la bulle sans penser du tout à la gravité*. Ils doivent juste étudier l'état quantique équivalent dans la frontière. Et depuis de nombreuses années, des dizaines de théoriciens explorent cette idée dans le papier de Maldacena et il est aujourd'hui l'un des articles les plus cités en physiques.

Et parmi ces enthousiastes, on retrouve notre Van Raamsdonk qui a commencé son congé sabbatique en se posant l'une des questions centrales de la découverte de Maldacena : *Comment un champ quantique dans la frontière produit la gravitation dans la bulle ?* On avait déjà des indices qui pourraient impliquer une sorte de relation entre la géométrie et l'intrication. Mais ces indices ne sont pas très clairs et les premiers travaux s'occupent de cas spécifiques tels que l'univers de la bulle qui posséderait un trou noir. Aussi, Van Raamsdonk a décidé de s'attaquer au problème et déterminer si la relation est vraie ou que c'est juste une étrangeté mathématique.

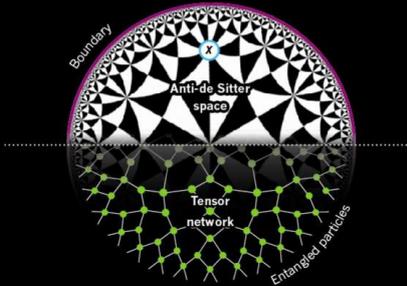
Il a d'abord considéré un univers-bulle vide qui correspond à un seul champ quantique dans l'univers-frontière. Ce champ, et les relations quantiques qui le maintenaient ensemble contenaient la seule intrication dans le système. Mais Van Raamsdonk s'est demandé ce qui se passerait dans l'univers-bulle si l'intrication de l'univers-frontière était supprimée. Il a pu répondre à cette question en utilisant des outils de mathématiques qui ont été introduits en 2006 par *Shinsei Ryu* de l'université de l'Illinois et *Tadashi Takanagi* de l'université de Kyoto. Leurs équations ont permis à Van Raamsdonk de modéliser une réduction méthodique et lente de l'intrication dans l'univers-frontière pour voir la réaction dans l'univers-bulle. Dans ce dernier, il a vu que l'espace-temps s'étirait jusqu'à un point de déchirement. *Si on réduisait l'intrication à zéro, alors cela fractionnerait l'espace-temps en morceaux déconnectés comme un chewing-gum qu'on aurait étiré jusqu'au point de rupture*.

Van Raamsdonk a réalisé que la relation géométrique/intrication était générale. L'intrication est l'ingrédient essentiel qui unit l'espace-temps dans un ensemble harmonieux alors qu'on pensait que cela concernait des cas exotiques comme les trous noirs. Van Raamsdonk a déclaré : *Je pense que j'ai compris quelque chose concernant une question fondamentale que personne n'a comprise auparavant*. Plus précisément : *Qu'est-ce que l'espace-temps ?*

La connexion de l'intrication

Le phénomène quantique connu comme l'intrication serait l'élément qui permet à l'espace de se comporter comme un espace homogène.

Dans un modèle infini de l'univers connu comme l'anti-de Sitter, les effets de la gravitation sur n'importe quel point x à l'intérieur sont mathématiquement équivalents à un champ quantique dans la frontière. On peut visualiser cet univers en 2D en le remplissant avec des triangles. Même si les triangles sont identiques, ils semblent déformés quand ils s'approchent de la frontière.



Les physiciens ont noté que ce Pattern ressemble aux diagrammes appelés réseaux Tensor qui ont été inventés pour montrer les relations entre des particules quantiques à grande échelle. Ces connexions sont connues comme une intrication quantique.

C'est quoi, une intrication quantique ?

En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen (EPR) ont découvert qu'il y a une connexion qui existe entre des systèmes quantiques séparés. La mesure de l'un des systèmes détermine l'état de l'autre.

Exemple :

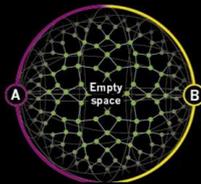


Spins intriqués : Si une particule pivote vers le haut, alors l'autre particule pivotera vers le bas et vice-versa.

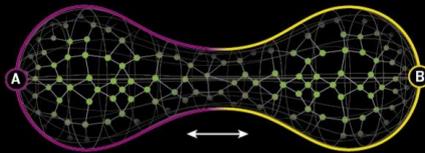
L'observation d'une particule révèle instantanément l'état de l'autre particule.

Désintrication

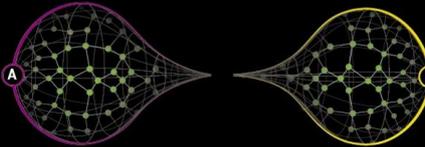
La correspondance frontière-bulle implique que l'espace à l'intérieur est composé d'intrication quantique autour de l'extérieur.



Même quand l'univers-bulle est vide, les champs quantiques dans n'importe quel des 2 régions (A et B) sont fortement intriqués l'un avec l'autre.



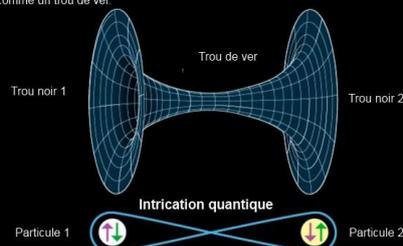
Si on réduit l'intrication entre ces 2 régions, alors l'univers-bulle commence à se fractionner.



Quand l'intrication est réduit à zéro, alors l'univers-bulle se divise en 2. Cela prouve que l'intrication est nécessaire pour l'espace puisse exister.

ER = EPR

Toujours en 1935, Einstein et Rosen (ER) ont démontré que des trous noirs séparés pouvaient être connectés par un tunnel via l'espace-temps et on connaît ce tunnel comme un trou de ver.



Les physiciens soupçonnent que la connexion dans le trou de ver et la connexion de l'intrication quantique sont la même chose, mais sur des échelles très différentes. En dehors de leur taille, il n'y a aucune différence.

Einstein et l'intrication

Son idée est *de considérer l'intrication quantique comme une colle géométrique* et c'est l'essence de son papier qui a été rejeté et de son essai qui avait gagné le concours. Et cette idée de colle géométrique résonne de plus en plus chez les physiciens. On n'a encore trouvé aucune preuve rigoureuse et l'idée est toujours une conjecture, mais de nombreux raisonnements indépendants supportent aujourd'hui la colle géométrique.

En 2013, Maldacena et *Leonard Susskind* de Stanford ont publié une conjecture appelée **ER = EPR** en l'honneur des fameux papiers de 1935. ER, par Einstein et *Nathan Rosen*, un physicien israélo-américain, ont introduit ce qu'on connaît aujourd'hui comme un *trou de ver*. Le trou de ver est un tunnel dans l'espace qui connecte 2 trous noirs. Notons qu'aucune particule ne peut voyager avec un trou noir (*en dépit de ce qu'on voit dans les films de science-fiction*), car il faudrait voyager plus vite que la vitesse de la lumière ce qui est impossible. EPR, par Einstein et le physicien américain Boris Podolsky, était le premier papier qui décrivait clairement ce qu'on connaît aujourd'hui comme *l'intrication*.

La conjecture de Maldacena et de Susskind est que ces 2 concepts étaient bien plus liés que les dates de publication de leurs papiers. Si l'une des deux particules est connectée par l'intrication, alors elles sont liées par un trou de ver. Et l'inverse est également possible. La connexion connue comme le trou de ver est équivalente à l'intrication. Ce sont différentes manières de décrire la même réalité sous-jacente.

Personne n'a une idée claire de cette réalité sous-jacente. Mais les physiciens sont de plus en plus convaincus qu'elle existe. Maldacena, Susskind et d'autres ont testé l'hypothèse ER = EPR pour voir si elle est mathématiquement consistante avec toutes les choses qu'on connaît sur l'intrication et le trou de ver et la réponse est oui.

Des connexions cachées

D'autres domaines supportent aussi une relation géométrie-intrication et on peut citer les physiques de matière condensée et la théorie de l'information quantique. Ce sont des domaines où l'intrication joue déjà un rôle important. Cela a permis aux chercheurs de ces disciplines d'attaquer la gravitation quantique avec de nouveaux concepts et d'outils mathématiques. Les *réseaux Tensor*, par exemple, sont une technique utilisée par les physiciens de matière condensée pour détecter les états quantiques d'une grande quantité de particules subatomiques. *Brian Swingle* les a utilisés de cette manière en 2009 lorsqu'il était un doctorant au MIT pour calculer comment les groupes d'électrons interagissent avec des matériaux solides. Il a découvert que le réseau le plus utile était de lier les paires d'électrons adjacents qui avaient le plus de chance d'interagir l'un avec l'autre plutôt que lier de grands groupes dans un pattern qui ressemble à un arbre généalogique. Mais ensuite, pendant un cours sur la théorie du champ quantique, Swingle a appris la correspondance bulle-frontière de Maldacena et il a noté un pattern intrigant : La cartographie entre la bulle et la frontière était la même que dans le réseau sous forme d'arbre généalogique.

Swingle s'est demandé si cette ressemblance était plus que de la simple coïncidence. Et en 2012, il a publié des calculs démontrant qu'il y avait autre chose. Il a atteint la même conclusion que Van Raamsdonk et cela a renforcé l'idée d'une géométrie-intrication. *Vous pouvez penser à l'espace comme étant construit à partir d'intrications* selon Swingle. Il voit que les réseaux Tensors sont de plus en plus utilisés pour explorer la correspondance géométrie-intrication.

Un autre exemple est la théorie des *codes correcteurs d'erreurs quantiques*. Ces derniers ont été inventés par les physiciens pour construire des ordinateurs quantiques. Ces machines encodent l'information dans des qubits tels qu'un Spin haut ou bas d'un électron et ces qubits peuvent prendre des valeurs de 1 et de 0 simultanément. En principe, quand des qubits interagissent et sont correctement intriqués, alors un tel appareil quantique pourrait faire des calculs qu'un ordinateur classique ne pourrait jamais finir même s'il fonctionnait pendant toute l'existence de l'univers. Mais en pratique, le processus est très fragile. La moindre perturbation de l'extérieur va déranger l'intrication délicate des qubits et détruire la possibilité d'un calcul quantique. Et c'est cette fragilité qui a inspiré des codes correcteurs d'erreur quantique. Ce sont des stratégies numériques qui corrigent les corrélations corrompues entre les qubits et améliorent la robustesse du calcul. Et la signature de ces codes est qu'ils ne sont jamais locaux. L'information, qui a besoin d'être restaurée, doit se propager sur de grandes distances. Autrement, le dommage sur un seul point pourrait détruire tout espoir de restauration. Et c'est cette non-localité qui fascine de nombreux théoriciens de l'information quantique lorsqu'ils voient la correspondance entre la frontière et la bulle de Maldacena, car ils y voient la même non-localité. L'information qui correspond à une petite région de la bulle est propagée sur une vaste région de la frontière. *Si on regarde l'AdS-CFT, alors tout le monde peut voir une vague analogie à un code correcteur d'erreur quantique* selon *Scott Aaronson*, un informaticien du MIT. Mais dans des travaux publiés en juin 2015, des physiciens menés par *Daniel Harlow* de l'université d'Harvard et *John Preskill* du *California Institute of Technology* avancent quelque chose de plus solide. **Que la dualité de Maldacena est elle-même un code correcteur d'erreur**. Et ils l'ont démontré avec un simple modèle mathématique et désormais, ils tentent de prouver leur théorie de manière plus générale. *On dit depuis des années que l'intrication est importante pour l'émergence de la bulle* selon Harlow. *Mais pour la première fois, je pense qu'on commence à s'approcher du comment et du pourquoi.*

Au-delà de l'intrication

Et cela suscite beaucoup d'intérêt, car la fondation *Simons*, une organisation philanthropique à New York a annoncé en aout 2015 qu'elle fournirait 2,5 millions de dollars par année pour au moins 4 ans afin d'aider les chercheurs à progresser dans la connexion entre la gravitation et l'information quantique. *La théorie de l'information fournit un moyen puissant pour structurer notre pensée dans les physiques fondamentales* selon Patrick Hayden, un physicien de Stanford qui dirige le programme de la fondation Simons. Il ajoute que *cette aide va supporter 16 principaux chercheurs dans 14 institutions dans le monde ainsi que des étudiants, des postdocs et une série d'ateliers*. L'objectif final est de construire un dictionnaire compréhensif pour traduire les concepts géométriques en langage quantique et vice-versa. Cela permettrait aux physiciens de compléter la théorie de la gravitation quantique.

Mais les chercheurs font toujours face à de nombreux obstacles. Le premier est que la correspondance bulle-frontière ne s'applique pas à notre univers. Ce dernier s'étend et il semble infini. La plupart des chercheurs dans ce domaine pensent que les calculs, en utilisant la correspondance de Maldacena, sont pertinents sur le vrai univers, mais il n'y a pas encore de consensus sur comment traduire les résultats d'un régime à l'autre.

Un autre défi est la définition standard de l'intrication qui fait référence à des particules à un moment donné. Une théorie complète de la gravitation quantique devra ajouter du temps à l'image d'ensemble. *L'intrication est une grande pièce du puzzle, mais ce n'est pas le puzzle* selon Susskind. Ce chercheur pense que les physiciens doivent embrasser un autre concept provenant de la théorie de l'information quantique qui est la **complexité algorithmique**. Cette dernière est le nombre d'états ou d'opérations logiques qui sont nécessaires pour construire l'état quantique d'un système. Un système avec une faible complexité est similaire à un ordinateur quantique qui aurait des qubits à quasiment zéro. Et on peut construire facilement ce type de machine. La machine avec une complexité élevée est similaire à une série de qubits encodant un nombre qui nécessiterait des siècles de calcul.

Susskind a commencé à penser à la complexité algorithmique il y a 10 ans quand il a noté qu'une solution aux équations d'Einstein de la relativité générale permettait à un trou de ver, dans l'espace Ads, d'aller de plus en plus loin à mesure que le temps passe. Et il s'est demandé sur la correspondance dans la frontière. Cela ne pouvait pas être une intrication, car les corrélations, qui produisent l'intrication entre différentes particules sur la frontière, atteignent leur maximum en moins d'une seconde. Dans un article de 2014, *Susskind* et *Douglas Stanford* de l'*Institute for Advanced Study* ont montré qu'en fonction de la progression du temps, l'état quantique sur la frontière varierait exactement de la manière que celle qui est prévue par la complexité algorithmique.

Il apparaît de plus en plus que le développement de l'intérieur d'un trou noir est la même chose que le développement de la complexité algorithmique selon Susskind. Si l'intrication quantique soude ensemble les pièces de l'espace, alors la complexité algorithmique pourrait mener le développement de l'espace et amène l'élément insaisissable du temps. Une conséquence potentielle, qu'il commence à explorer, serait un lien entre le développement de la complexité algorithmique et l'expansion de l'univers. Les parties internes d'un trou noir sont des régions où la gravité quantique semble dominer et la complexité algorithmique pourrait avoir un rôle central pour compléter la théorie de la gravitation quantique.

Et en dépit de ces obstacles, la plupart des chercheurs estiment qu'ils ont commencé à pointer vers quelque chose d'extrêmement réel et important. *Avant, j'ignorais la composition de l'espace* selon Swignle. *On ignorait même si la question avait un sens. Mais il est évident que cette question a désormais un sens et nous avons même la réponse. L'espace est fait d'intrications*. Et pour Van Raamsdonk, qui a écrit plus de 20 papiers sur l'intrication quantique depuis 2009, vous serez ravi d'apprendre qu'ils ont tous été publiés et que personne ne fait plus référence à une utilisation intensive du Cannabis.