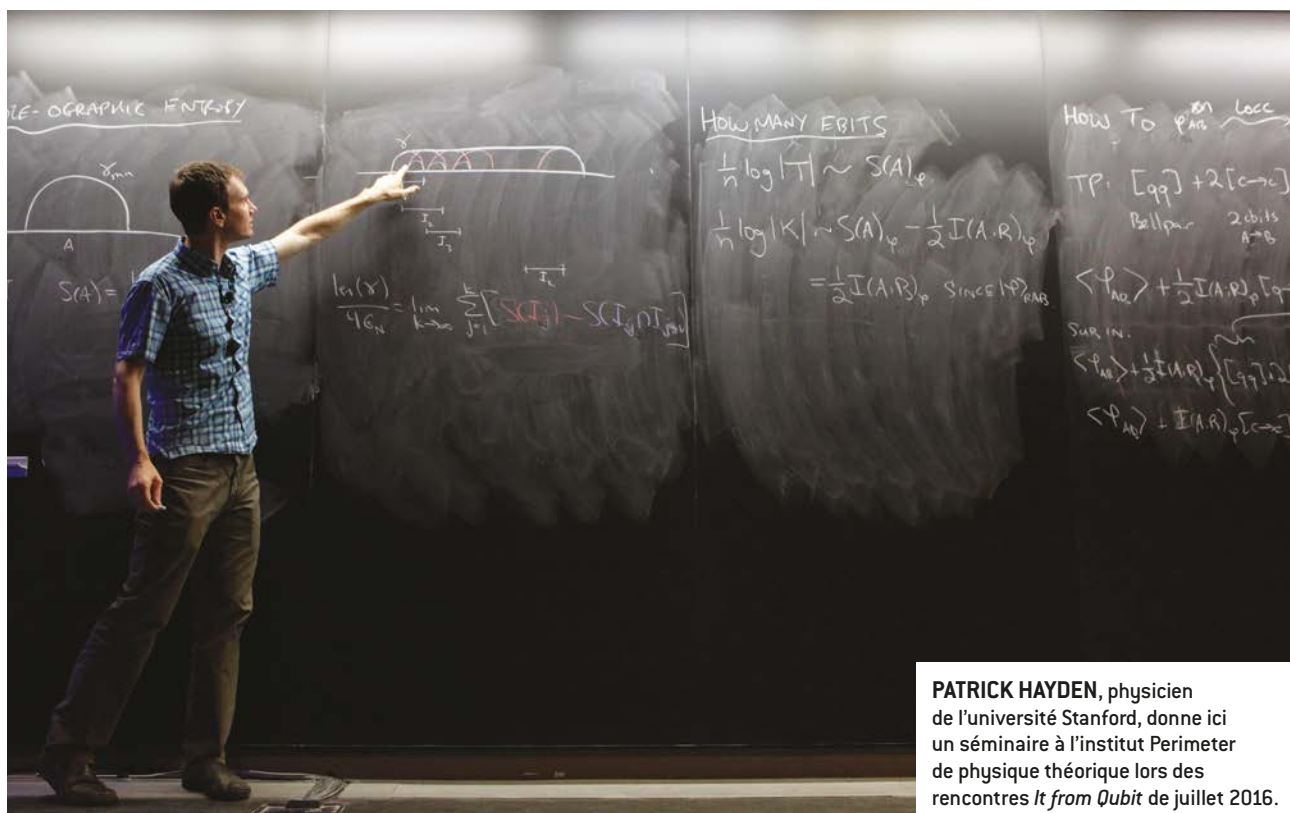




PATRICK HAYDEN, physicien de l'université Stanford, donne ici un séminaire à l'institut Perimeter de physique théorique lors des rencontres *It from Qubit* de juillet 2016.

Depuis peu, les physiciens considèrent qu'il existe plusieurs formes d'intrication. Dans la plus simple, plusieurs particules de même nature réparties dans l'espace sont reliées par une unique caractéristique (leur spin ou leur polarisation, par exemple). Mais, comme dit Vijay Balasubramanian, ce type d'intrication ne suffit pas pour reconstruire l'espace-temps. D'autres formes d'intrication seraient plus pertinentes. Par exemple, on peut imaginer des intrications entre particules de natures différentes. Les chercheurs explorent aussi la complexité déroutante de l'intrication d'un grand nombre de particules.

Une fois que les différents aspects de l'intrication seront mieux compris et maîtrisés, les chercheurs comprendront peut-être comment l'espace-temps émerge de ce phénomène. L'émergence est quelque chose que l'on retrouve par exemple en thermodynamique ou en météorologie, où les mouvements microscopiques des molécules de l'air donnent naissance à la pression et à d'autres grandeurs macroscopiques. « Ce sont là des phénomènes émergents », explique Netta Engelhardt. « Quand vous faites un zoom arrière sur quelque chose, vous voyez un tableau différent dont vous ne sauriez pas qu'il

découle d'une dynamique à plus petite échelle. » De façon analogue, on voit l'espace-temps mais nous ne comprenons pas la dynamique quantique fondamentale à partir de laquelle il émerge.

Hologrammes cosmiques

À terme, l'objectif de tous ces travaux est d'enfin parvenir à une théorie qui décrit la gravité d'un point de vue quantique. Mais les physiciens qui se sont donné cette ambition se heurtent à un mur depuis un siècle. Les participants au projet *It from Qubit* misent sur l'idée du « principe holographique » pour réussir là où leurs prédécesseurs ont échoué.

Ce principe suggère que certaines théories physiques sont équivalentes à d'autres, plus simples, qui s'appliquent dans un univers de dimensionnalité inférieure. On retrouve cette idée avec les hologrammes : une carte postale en deux dimensions portant un hologramme de licorne peut contenir toute l'information nécessaire pour décrire et représenter la forme tridimensionnelle de la licorne. Dans cette logique, puisqu'il est si difficile de trouver une théorie satisfaisante

de la gravité quantique, les physiciens tentent de trouver une théorie équivalente, plus maniable, valable dans un univers de dimensionnalité inférieure à la nôtre.

L'une des incarnations les plus réussies du principe holographique est la « correspondance AdS/CFT », sigles faisant référence à l'équivalence entre un modèle cosmologique dit univers anti-de Sitter (AdS) et un cas particulier de théorie quantique des champs, dite théorie conforme des champs (CFT pour *conformal field theory*), définie à la frontière de l'univers anti-de Sitter et dénuée de gravité. Par cette approche, il est possible de décrire complètement un trou noir à partir de ce qui se passe à la frontière de l'univers. Juan Maldacena a établi cette relation à la fin des années 1990, alors qu'il travaillait dans le cadre de la théorie des cordes. Dans cette dernière, les particules fondamentales, considérées jusque-là comme ponctuelles, sont remplacées par de minuscules cordes. L'objectif était de résoudre certains problèmes de calcul pour développer une description quantique de la gravitation.

Grâce à la correspondance AdS/CFT, les physiciens espèrent découvrir une théorie qui est équivalente à la gravitation quantique, tout en étant beaucoup plus

simple à manipuler – en laissant de côté la gravitation. « Il est très difficile d'obtenir des descriptions quantiques pour les théories avec gravitation, alors que celles sans gravitation sont beaucoup plus faciles à décrire complètement », insiste Vijay Balasubramanian.

Une théorie de la gravitation... sans gravitation

Mais comment une théorie laissant de côté la gravité pourrait-elle être légitime en tant que théorie quantique de la gravitation ? La réponse viendrait peut-être de la nature fondamentale de la gravitation. La gravité et l'espace-temps pourraient n'être que le produit final, en trois dimensions, de l'intrication des qubits dans un espace n'ayant seulement que deux dimensions.

Depuis une vingtaine d'années, les physiciens ont montré que la correspondance AdS/CFT fonctionne dans certaines situations, sans bien comprendre pourquoi. « Nous savons que ces deux théories sont duales [équivalentes], mais la raison pour laquelle la dualité fonctionne n'est pas claire », raconte Brian Swingle. « L'un des résultats qu'on espère [du projet IfQ] serait une théorie expliquant comment surgissent ces dualités. »

La théorie de l'information quantique pourrait aussi contribuer à ce projet grâce à un outil de cette discipline : les codes quantiques correcteurs d'erreurs. Les chercheurs en informatique quantique ont conçu ces codes pour aider à protéger l'information d'éventuelles pertes en cas d'interférences avec les intrications des qubits. Les ordinateurs quantiques, au lieu de coder l'information avec des bits uniques, utilisent des états hautement intriqués de multiples qubits. Le système reste ainsi robuste : une erreur unique ne peut pas affecter l'exactitude d'un élément d'information donné. Mais de façon surprenante, ces codes correcteurs pourraient jouer un rôle dans la correspondance AdS/CFT.

En effet, les mathématiques impliquées dans ces codes se retrouvent aussi dans cette dernière. Il semble que l'arrangement utilisé par les chercheurs pour intriquer de multiples bits et former des réseaux exempts

d'erreurs soit aussi en jeu dans, par exemple, le codage de l'information de l'intérieur du trou noir que l'on retrouve à sa surface à travers l'intrication.

Même si les physiciens parviennent à comprendre comment fonctionne la correspondance AdS/CFT, et par là à concevoir une théorie de dimensionnalité inférieure qui se substitue à la gravité quantique, ils ne seront toutefois pas encore au bout de leurs peines. La correspondance elle-même ne fonctionne que dans une version simplifiée de l'Univers.

En particulier, toutes les lois de la gravitation qui s'appliquent à notre Univers n'interviennent pas dans le monde épuré de la correspondance. « La correspondance AdS/CFT possède une sorte de gravitation, mais ce n'est pas la théorie de la gravitation dans un univers en expansion comme celui où nous vivons », explique Brian Swingle. L'univers anti-de Sitter ne contient pas de matière, juste une constante cosmologique de valeur négative. Et, décrit d'une certaine façon, il est stable : ni en expansion ni en contraction (voir l'encadré page 26). Si notre

Univers contient aussi une constante cosmologique, elle doit être légèrement positive pour s'accorder aux observations sur l'expansion accélérée du cosmos. Néanmoins, ce modèle fournit aux physiciens un terrain de jeu théorique utile pour tester leurs idées, et appréhender plus simplement la gravitation quantique.

Si le projet IfQ repose sur des fondements irréalistes, font remarquer certains sceptiques, peut-il vraiment produire des résultats valables ? « C'est une critique légitime », concède Netta Engelhardt. « Pourquoi nous concentrons-nous sur ce modèle simplifié ? Tout cela dépend de la validité du modèle simplifié et de l'idée que, *in fine*, il est une version approchée, mais satisfaisante, de notre Univers. J'aimerais avoir la certitude que si nous comprenons le modèle simplifié, nous comprendrons la réalité. » Les participants du projet IfQ font le pari qu'en partant d'un tableau simplifié plus facile à manipuler, ils pourront à terme y greffer la complexité nécessaire pour appliquer la théorie au monde réel.

Malgré ces réserves, les physiciens affirment que l'approche vaut la peine d'être tentée. Elle a déjà ouvert de nouvelles pistes

« L'étoffe de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents, quelle qu'en soit la nature »

Vijay Balasubramanian