

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Le prix de la réciprocité

Un cadeau engage toujours son bénéficiaire d'une façon ou d'une autre. Une réciprocité qui serait profondément ancrée dans notre passé évolutif.

La campagne présidentielle qui s'achève en France a vu beaucoup de questions relatives à la moralité soulevées. Par exemple, est-il raisonnable pour un candidat à la plus haute fonction de la République d'accepter de se faire offrir de très onéreux costumes sur mesure ? Le bénéficiaire de ce cadeau a en partie lui-même répondu à cette question, puisqu'il a restitué ces vêtements en reconnaissant qu'il avait commis une erreur. On ne saura jamais si l'acceptation de ce cadeau était assortie de promesses faites à son auteur. Dans ce cas, évidemment, la violation de la conduite morale que l'on attend d'un politique eut été parfaitement établie. Dans le cas contraire, c'est-à-dire l'acceptation d'un cadeau sans engagement particulier, est-on bien certain que la situation n'est pas sans risque ? Chacun a bien compris que même si aucune promesse n'avait été faite, restait la question épineuse de la réciprocité. De quelle façon un présent nous engage-t-il ?

Sur le plan formel, rien ne nous contraint à devenir l'obligé de celui ou celle qui nous a fait un cadeau. Mais en pratique, cette relation n'établit-elle pas un système de contraintes implicites ? C'est précisément une question que s'est posée Robert Cialdini, psychologue à l'université de Columbia. Pour écrire son célèbre livre *Influence et manipulation* (*Influence, the Psychology of Persuasion*, 1984) le chercheur a étudié des résultats de la psychologie sociale de l'influence, mais il a aussi observé pendant plusieurs années les pratiques des vendeurs de voiture, de sociétés de télémarketing ou encore de militants d'associations

caritatives. Son travail lui a permis de conclure qu'un cadeau entraîne mécaniquement une forme de réciprocité beaucoup plus contraignante qu'on ne pourrait le croire.

D'ailleurs, ces principes ont été appliqués de façon extensive dans le marketing. Qui n'a pas accepté de goûter dans un supermarché un nouveau jus de fruit ou un gâteau apéritif et acheté dans la foulée un produit dont il

sociologue américain Alvin Gouldner (même s'il insistait pour rappeler l'omniprésence de formes asymétriques de réciprocité), et la psychologie évolutionniste a proposé une interprétation intéressante (quoique spéculative) de la question.

Ainsi, le psychologue social américain Roy Baumeister voit dans la réciprocité une condition même de la survie de certaines espèces. En effet, a-t-il remarqué dans son livre *The Cultural Animal: Human Nature, Meaning and Social Life* (2005), les hasards de la chasse, par exemple, peuvent conduire un individu à abattre une proie qu'il ne pourra manger seul. Dans ces conditions, il est plus intéressant pour lui de partager en espérant que les bénéficiaires de ce don seront eux aussi généreux lorsqu'il connaîtra la faim.

Pour Roy Baumeister et les psychologues évolutionnistes, les groupes non dotés de cette aptitude à la réciprocité ont tout simplement moins de chances de survivre que les autres. Autrement dit, la réciprocité serait une sorte d'assurance contre la rareté des ressources lorsqu'une espèce est confrontée aux fluctuations de celles-ci. Dans ces conditions, on comprend dans quelle intimité de notre nature même, amplifiée par de nombreuses règles sociales, se loge le principe de réciprocité. On comprend aussi combien la décision qui prétend défendre l'intérêt général, comme c'est le cas de la gouvernance politique, doit se protéger de l'influence du principe de réciprocité. ■



© Shutterstock.com/NiradArt

n'avait nullement besoin ? Les échantillons gratuits, les sourires, les compliments venant d'un inconnu dans la rue qui veut recueillir quelques oboles pour une cause ou une autre ou même encore un simple verre offert dans un bar induisent un système d'interactions subtiles qui peuvent nous conduire à accepter ce que nous n'aurions pas désiré faire quelques minutes auparavant.

Pourquoi ce principe de réciprocité est-il à ce point ancré en nous ? Certains en ont souligné le caractère universel, comme le

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



TERRA DATA

NOS VIES À L'ÈRE
DU NUMÉRIQUE

EXPOSITION DU 04/04/17 AU 07/01/18

AVEC LA PARTICIPATION DE



AVEC LE SOUTIEN DE



EN PARTENARIAT AVEC



TROUS NOIRS INTRIKUÉS

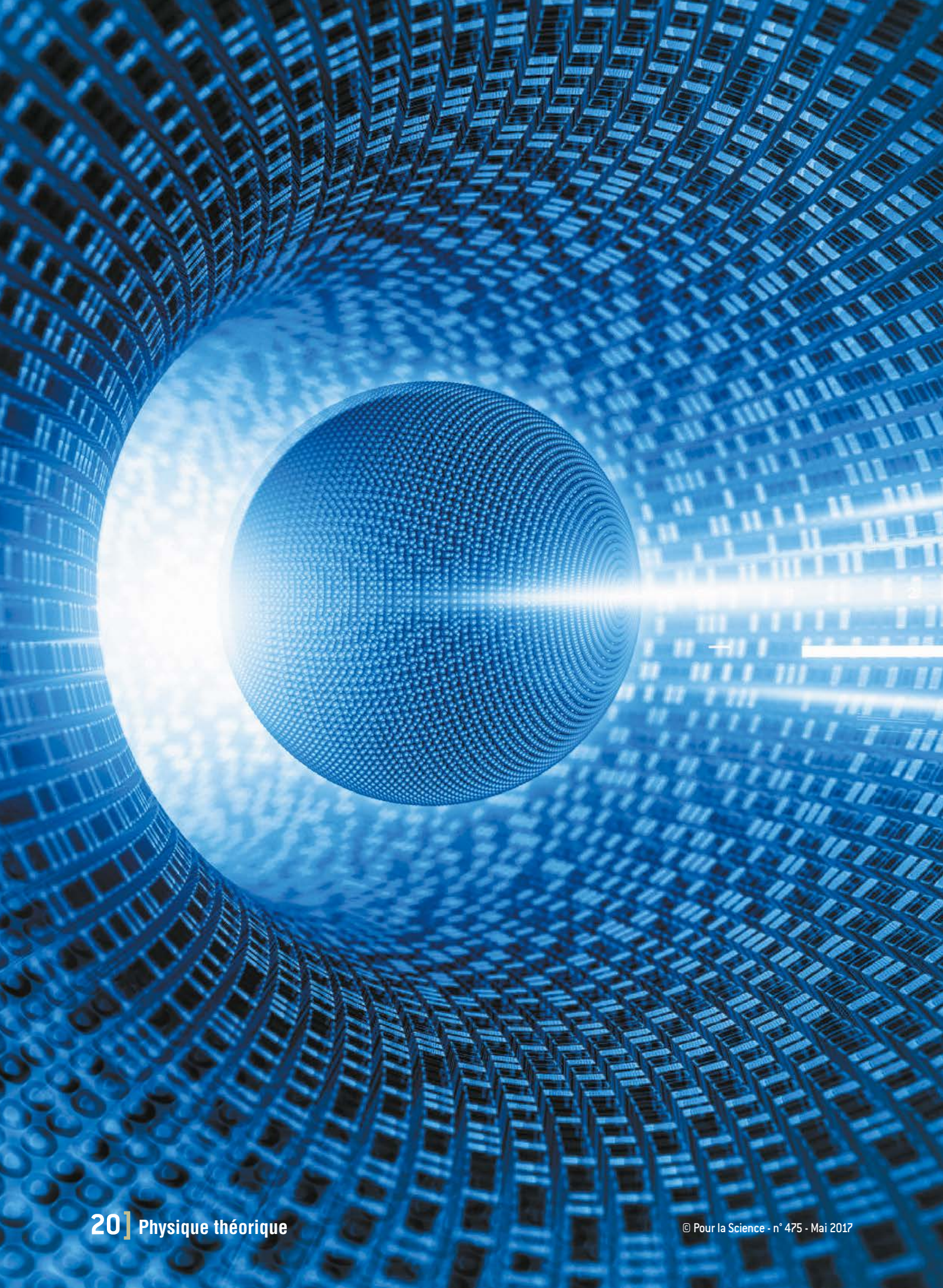
Une porte vers l'espace-temps quantique

Dans leur quête pour réconcilier les deux sœurs ennemies de la physique du XX^e siècle – la physique quantique et la relativité générale – les théoriciens ont récemment formulé une hypothèse enthousiasmante !

Leur proposition ? L'espace-temps, décrit par la relativité générale, serait un phénomène émergent, qui prendrait racine dans des interactions quantiques d'objets plus fondamentaux. Mais que sont ces objets ? Comment exactement l'espace-temps naît-il de leurs interactions ? De nombreux physiciens s'associent dans un projet pluridisciplinaire pour comprendre les implications de cette fascinante hypothèse, avec l'espoir d'aboutir enfin à une théorie quantique de la gravitation et de l'espace-temps (voir l'article de Clara Moskowitz, pages 20 à 26).

Dans ce contexte dynamique, des idées spectaculaires voient le jour. Ainsi, les travaux de Juan Maldacena et Leonard Susskind, des physiciens de premier plan, suggèrent une équivalence entre trou de ver et intrication quantique (voir l'article de Juan Maldacena, pages 28 à 35). Pourtant, tout sépare ces deux phénomènes : les trous de ver relèvent de la relativité générale et décrivent des sortes de raccourcis liant deux régions éloignées de l'espace-temps, tandis que l'intrication de deux objets est un phénomène purement quantique, où les deux objets ont leurs propriétés fortement corrélées, indépendamment de la distance qui les sépare. Un pont très inattendu entre deux domaines, qui rapproche peut-être les physiciens de leur Graal. ■

Sean Bailly



À la poursuite de l'espace-temps QUANTIQUE

Clara Moskowitz

L'espace et le temps émergeraient de l'intrication quantique de minuscules bribes d'information : telle est l'audacieuse hypothèse explorée par le projet collaboratif intitulé *It from Qubit*.

Pour Shakespeare, «le monde entier est un théâtre». Les physiciens partagent cette définition, mais pour eux, le théâtre est plus précisément l'espace. Celui-ci serait la scène sur laquelle entrent en action les forces et les particules qui l'occupent. L'espace, tel qu'on le conçoit généralement, n'est constitué de rien de matériel.

Cependant, les chercheurs commencent à mettre en doute cette vision. L'espace (ou plutôt l'espace-temps dans le contexte de la théorie de la relativité générale) pourrait être composé de minuscules bouts d'information. Selon cette approche, ces petits éléments, en interagissant, créent l'espace-temps et font émerger ses propriétés, telles que la courbure – dont découle la gravité.

Cette idée, si elle est correcte, n'expliquerait pas seulement l'origine de l'espace-temps. Elle aiderait aussi les physiciens à formuler la théorie quantique de la gravitation qui se fait attendre depuis si longtemps. En effet, les physiciens ont développé au XX^e siècle deux théories irréconciliables, la relativité générale, qui décrit la dynamique de l'espace-temps, et la physique quantique, qui régit le monde des particules et de leurs interactions.

Le projet *It from Qubit* réunit plusieurs fois par an une centaine de physiciens pour réfléchir à ces nouvelles idées. Le nom de ce projet résume l'hypothèse qui anime ces chercheurs : le *it* est ici l'espace-temps et le *qubit* représente la plus petite quantité d'information – la version quantique du bit informatique.

L'idée que l'Univers serait construit à partir d'informations a été popularisée dans les années 1990 par le physicien américain John Wheeler et son expression «*It from Bit*». Pour lui, toute la physique serait décrite au niveau le plus fondamental à partir d'information. Un quart de siècle plus tard, avec les progrès en physique quantique, le *bit* est devenu *qubit* et l'idée s'est modernisée.

La réunion *It from Qubit* (IfQ) qui s'est tenue en juillet 2016 à l'institut Perimeter de physique théorique, au Canada, illustre l'engouement autour de cet axe de recherche. Les organisateurs attendaient environ 90 personnes, mais ils ont reçu tellement de demandes qu'ils ont finalement accueilli 200 participants et ont animé, en simultané, six sessions parallèles dans d'autres universités. «Je pense que c'est l'une des voies les plus prometteuses, si

ce n'est la voie, pour parvenir à la gravité quantique», confie Netta Engelhardt, postdoctorante à l'université Princeton et qui a assisté à plusieurs de ces réunions. «C'est vraiment en train de décoller.»

Un pont entre plusieurs disciplines

Parce que le projet concerne à la fois la science des ordinateurs quantiques, l'étude de l'espace-temps dans le cadre de la relativité générale, la physique des particules et la théorie des cordes, il réunit des chercheurs de communautés qui n'ont pas l'habitude de collaborer. Il y a plus d'un an, la fondation Simons, un organisme privé qui soutient la recherche scientifique, a décidé d'allouer un budget pour lancer le projet collaboratif *It from Qubit* et financer les recherches et les rencontres des physiciens sur ce sujet. Depuis, l'excitation n'a cessé de croître, et les rencontres successives ont attiré de plus en plus de chercheurs, parmi lesquels des membres de la collaboration financée par la fondation Simons mais aussi de nombreuses autres personnes simplement intéressées par le sujet.

L'intérêt pour le projet IfQ s'étend bien au-delà du cercle de chercheurs qui y participent. Par exemple, Brian Greene, théoricien des cordes à l'université Columbia et extérieur à IfQ, souligne que «si le lien avec la théorie de l'information quantique est aussi fructueux que certains l'anticipent, tout cela pourrait bien déboucher sur la prochaine révolution de notre compréhension de l'espace et du temps. C'est un projet important et tout à fait passionnant.»

L'idée selon laquelle l'espace-temps n'est pas fondamental, mais émerge de bits d'information et est «constitué» de quelque chose, marque une rupture par rapport au tableau dépeint par la relativité générale. De quoi exactement ces bits sont-ils faits et quel type d'information contiennent-ils ? Les chercheurs l'ignorent. Mais curieusement, cela ne semble pas les déranger. «Ce qui compte, ce sont les relations [entre les bits plus que les bits eux-mêmes]», explique Brian Swingle, postdoctorant à l'université Stanford. «Toute la richesse vient de ces relations collectives. Ici, l'élément crucial, ce n'est pas les constituants, mais la manière dont ils s'organisent.»

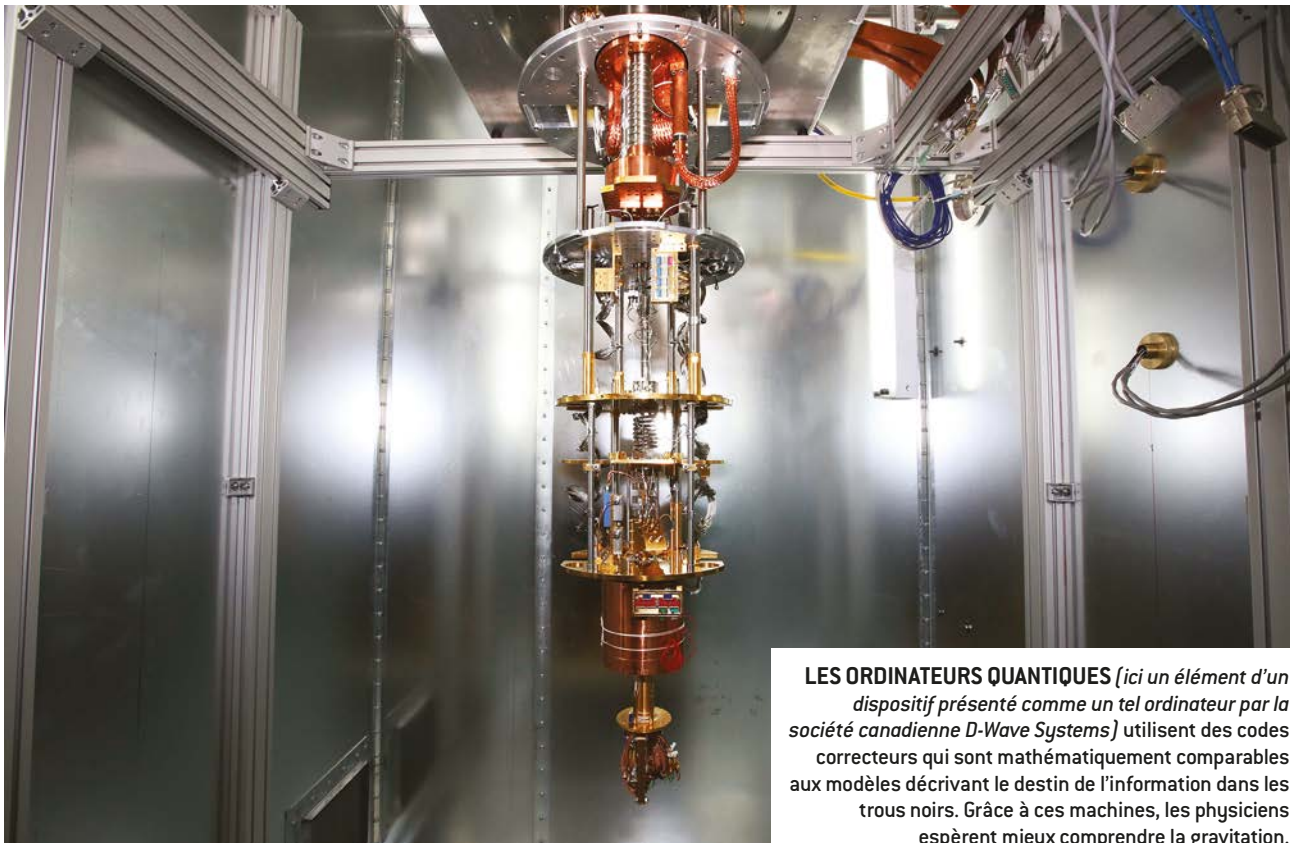
La clé de cette organisation pourrait être l'étrange phénomène que l'on

L'ESSENTIEL

■ L'espace-temps pourrait être constitué de minuscules éléments d'information liés par le phénomène d'intrication quantique.

■ Des physiciens explorent cette idée dans le cadre d'un programme de recherche intitulé *It from Qubit*, qui réunit des spécialistes de l'informatique quantique et des physiciens de la relativité générale et de la théorie des cordes.

■ L'objectif, à terme, est d'obtenir une théorie quantique de la gravitation, compatible avec la physique quantique et avec la relativité générale.



LES ORDINATEURS QUANTIQUES (ici un élément d'un dispositif présenté comme un tel ordinateur par la société canadienne D-Wave Systems) utilisent des codes correcteurs qui sont mathématiquement comparables aux modèles décrivant le destin de l'information dans les trous noirs. Grâce à ces machines, les physiciens espèrent mieux comprendre la gravitation.

■ L'AUTEURE



Clara MOSKOWITZ est rédactrice pour la revue *Scientific American* où elle couvre l'astrophysique, la cosmologie et la physique.

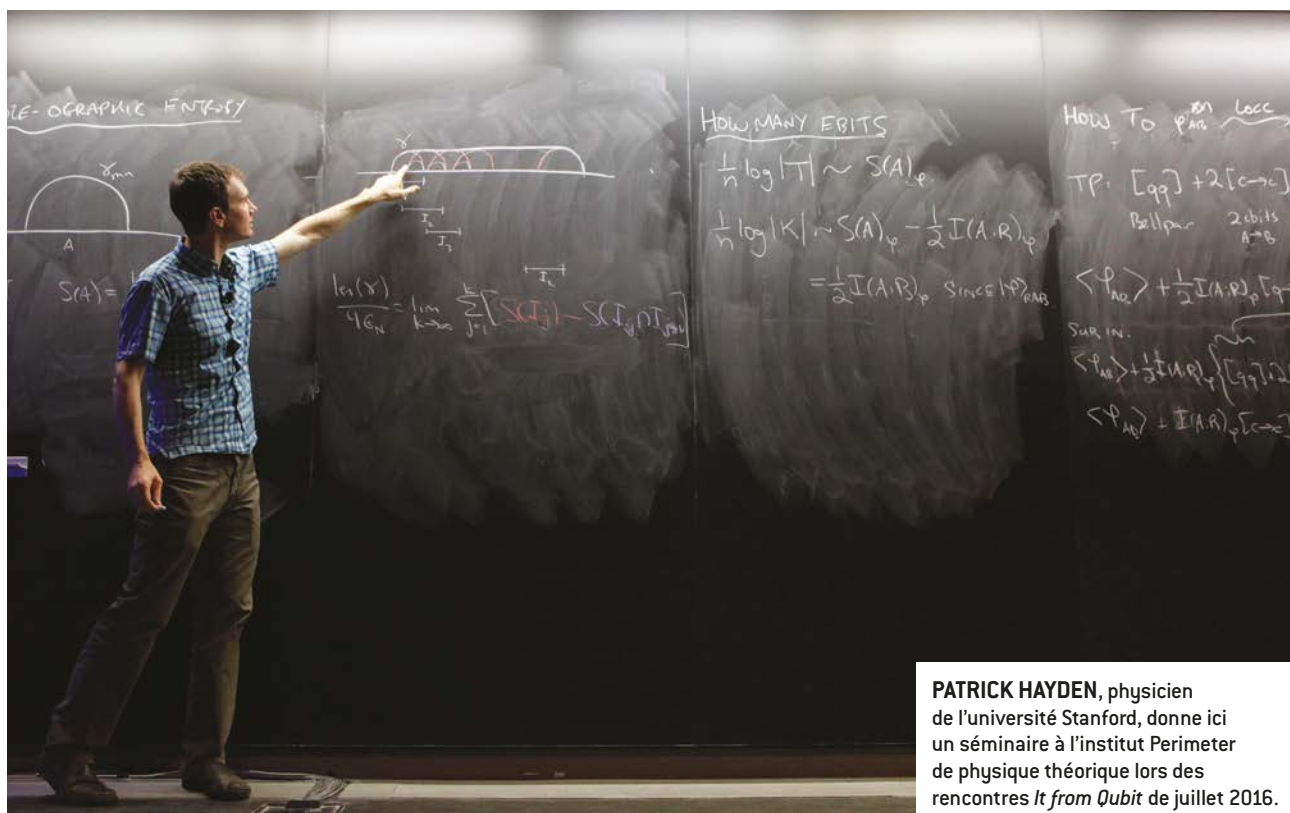
nomme intrication quantique : une corrélation bizarre qui peut exister entre deux particules, et grâce à laquelle des mesures réalisées sur l'une des particules ont un effet instantané sur l'autre, même quand une grande distance les sépare. « Selon une idée fascinante proposée récemment, l'étoffe de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents d'espace-temps, quelle qu'en soit la nature », explique Vijay Balasubramanian, physicien à l'université de Pennsylvanie et l'un des principaux collaborateurs d'IfQ.

Le raisonnement qui sous-tend cette idée est le produit d'une série de découvertes réalisées par des physiciens, notamment par Shinsei Ryu, maintenant à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis, et Tadashi Takayanagi, maintenant à l'université de Kyoto, au Japon. En 2006, ces deux chercheurs ont mis en évidence une connexion entre l'intrication quantique et la géométrie de l'espace-temps. En 2013, en s'appuyant sur ces travaux, Juan Maldacena, de l'Institut d'études avancées de Princeton, et Leonard Susskind, à l'université Stanford, ont montré que si deux trous noirs étaient intriqués, ils créeraient un trou de ver, un raccourci

dans l'espace-temps prédit par la relativité générale (voir l'article de Juan Maldacena, pages 28 à 35). Cette idée a été surnommée ER=EPR, d'après les noms des physiciens qui ont suggéré ces phénomènes : Albert Einstein et Nathan Rosen pour les trous de ver, Einstein, Rosen et Boris Podolsky pour l'intrication quantique. Cette découverte, et d'autres comparables, suggèrent que, curieusement, l'intrication quantique (dont on pensait qu'elle ne faisait intervenir aucun lien physique) peut façonner l'espace-temps.

Afin de comprendre comment l'intrication pourrait donner lieu à l'espace-temps, les physiciens doivent d'abord mieux comprendre comment l'intrication fonctionne.

Ce phénomène nous paraît « fantomatique », pour reprendre les mots d'Einstein, lorsque lui et ses collaborateurs l'ont prédit en 1935, parce qu'il implique une connexion instantanée entre particules même très éloignées. Une situation qui semble défier la relativité restreinte qui stipule que rien ne peut voyager plus vite que la lumière. L'intrication quantique a cependant été confirmée par de nombreuses expériences, sans pour autant violer les principes de la relativité restreinte.



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

de recherche intéressantes. «Je pense depuis longtemps que la relation entre l'information quantique et la gravitation quantique est d'une importance fondamentale», confie Raphael Bousso, physicien à l'université de Californie à Berkeley. «La connexion s'est approfondie au fil des ans, et je suis ravi de voir autant de chercheurs talentueux travailler ensemble pour s'atteler à ces questions et voir où elles nous mènent.»

Théoricienne à l'université Stanford, Eva Silverstein, qui elle non plus n'est pas membre du projet, est du même avis : «Il est clairement utile de développer l'information quantique et de l'appliquer à ces problèmes. Mais pour comprendre la dynamique [de la gravitation quantique], il faut encore d'autres éléments, et il est important que la discipline ne se concentre pas trop sur une approche unique.»

Un projet qui portera des fruits

De plus, même si le projet n'aboutit pas au développement d'une théorie quantique de la gravitation, il aura vraisemblablement des retombées fructueuses. L'application de techniques et d'idées inspirées de la théorie des cordes et de la relativité générale à des questions d'information quantique aidera, par exemple, à mieux définir les différents types d'intrication quantique, à la fois pour comprendre l'espace-temps et pour construire des ordinateurs quantiques.

«Quand vous commencez à jouer avec ces outils dans un cadre différent, il y a de bonnes chances que cela mène à de nouvelles idées qui sont intéressantes et qui pourraient être utiles dans d'autres domaines», s'enthousiasme Dorit Aharonov, spécialiste en informatique quantique à l'université hébraïque de Jérusalem et participante au projet IfQ. «Il semble que l'on soit en train de progresser sur des questions posées depuis de nombreuses années, ce qui est passionnant.» Par exemple, des chercheurs ont trouvé qu'il serait possible de mesurer le temps à l'intérieur d'un trou de ver en le représentant comme un circuit quantique, que l'utilisation de la théorie des cordes et de l'intrication permet de définir certaines phases de la matière condensée, etc.

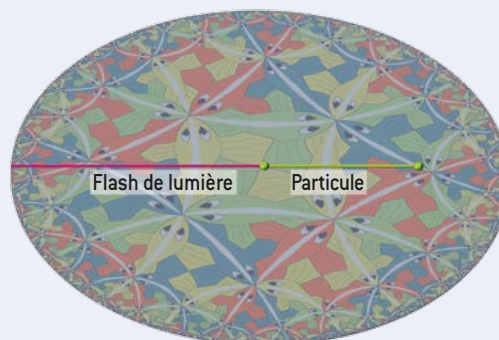
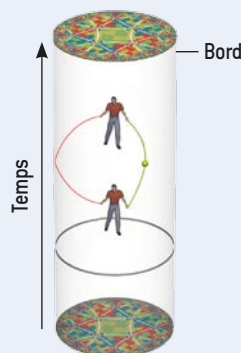
En outre, combiner information quantique et théorie des cordes aiderait aussi à évaluer les théories que les chercheurs proposeront. On peut se représenter n'importe quelle théorie physique comme un ordinateur,

Un univers-jouet à courbure négative

Un univers anti-de Sitter est un monde dont l'espace-temps est à courbure négative, ou hyperbolique. Dans le cas de deux dimensions d'espace, on peut le représenter par un disque de Poincaré (à droite). En y ajoutant le temps (axe vertical, à gauche), on

obtient un cylindre plein dont chaque section est un espace hyperbolique. Cet univers possède une certaine forme de gravitation. Une particule lancée du centre y retourne en un temps fini. Un rayon de lumière ira jusqu'au bord de l'espace avant de revenir

dans le même temps. La description de cet univers est équivalente à une théorie des champs dite conforme définie sur l'enveloppe du cylindre. Elle comporte une dimension spatiale de moins et est dénuée de gravitation, ce qui facilite les calculs.



© A. Kavanagh/Steve Levy, université du Minnesota

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Binétruy, **Au-delà de la relativité générale : «une théorie quantique de la gravitation est nécessaire»**, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

J. Maldacena, **La gravité est-elle une illusion ?**, *Dossier Pour la Science*, n° 83, avril-juin 2014.

S. Sachdev, **Métaux étranges et théorie des cordes**, *Pour la Science*, n° 429, juillet 2013.

J. Maldacena, **The large-N limit of superconformal field theories and supergravity**, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 38(4), pp. 1113-1133, 1999.

Site internet du projet *It from Qubit* : <http://bit.ly/PLS475>IfQ>

ses entrées et ses sorties étant l'équivalent d'un état initial et d'un état ultérieur, mesurable, décrits par la théorie. Lorsque les chercheurs proposeront une théorie candidate pour la gravitation quantique, ils pourront la tester avec cette analogie et se demander quelle est la puissance de calcul de la théorie. «Si cette puissance est trop grande, si notre modèle de gravitation quantique était capable de calculer des choses dont nous pensons qu'elles ne peuvent pas être calculées dans notre monde, cette théorie susciterait un doute», explique Dorit Aharonov. «C'est un moyen de dire, par une approche différente, si la théorie tient la route ou non.»

Le projet *It from Qubit* rappelle à certains physiciens une autre époque grisante où de grandes idées voyaient le jour. «J'ai commencé ma thèse en 1984, au moment de la révolution de la première théorie des cordes», dit Hiroshi Ooguri, physicien à Caltech, l'institut de technologie de Californie. «C'était une période très enthousiasmante, où la théorie des cordes émergeait en tant que principale candidate pour une théorie unifiée de toutes les forces de la nature. Je vois d'un même œil l'actuelle explosion d'intérêt autour de ces idées. C'est clairement une époque passionnante pour les jeunes de la discipline comme pour ceux d'entre nous qui ont obtenu leur thèse de doctorat il y a plusieurs décennies.» ■

Dès le prochain numéro, retrouvez la nouvelle formule de Pour la Science

- ◆ Davantage d'actualités
- ◆ De nouvelles rubriques
- ◆ Un graphisme plus contemporain



ASTROPHYSIQUE

L'ESSENTIEL

- « Un milliardaire de la Silicon Valley finance un projet audacieux : envoyer une sonde vers une des plus proches roches inhabitées du Soleil. »
- « La mission, baptisée Breakthrough Starshot, utilisera des lasers pour propulser des « voiles solaires » vers à des petites planètes de type terrestre qui gravitent... »

L'AUTEUR

ANN FINKELSTEIN
est astronome scientifique.

En route vers Alpha du Centaure

LE RÊVE D'ATTEINDRE LES ÉTOILES VA-T-IL SE RÉALISER ? UN MILLIARDAIRE FINANCE LE PROJET DE SONDE STARSHOT QUI, TEL UN VOILIER DE L'ESPACE, ATTEINDRA DES VITESSES EXCEPTIONNELLES POUR RENDRE VISITE À L'UNE DES ÉTOILES LES PLUS PROCHES DU SYSTÈME SOLAIRE.

Au printemps 2006, je me suis retrouvé à une réception en compagnie de brillants physiciens et mathématiciens Freeman Dyson, alors âgé de 93 ans et professeur émérite à l'Institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey. Il est connu pour ne jamais dire ce qu'il en attend de lui, et je lui ai donc demandé : « Quoi de neuf ? » Il a souri de son sourire ambigu, et a répondu : « Apparemment, nous allons rendre visite à Alpha du Centaure ». Cette étoile est l'une des plus proches voisines de notre Soleil, et un milliardaire de la Silicon Valley avait récemment annoncé qu'il finançait un projet baptisé Breakthrough Starshot pour y envoyer un vaisseau spatial d'un type nouveau. « Et c'est une bonne idée ? », ai-je demandé. Le sourire de Dyson s'est élargi. « Non, c'est idiot. Mais le vaisseau est intéressant. » Le principe du vaisseau est effectivement intéressant, au lieu de l'habitacle fusée pro-

publié par des réactions chimiques et suffisamment grande pour transporter des humains ou des instruments lourds, Starshot est un essaim de minuscules puces électroniques multifonctions appelées StarChips, minuscules caractères d'imprimerie. Elles sont propulsées à l'aide d'un laser à haute puissance. La voile serait tellement légère que quand elle serait frappée par un faisceau laser, elle accélérerait jusqu'à 20 pour cent de la vitesse de la lumière. Alpha du Centaure étant située à 4,37 années lumière de nous, la plus rapide des fusées mettrait quatre mille ans pour aller rendre visite à Alpha du Centaure. À l'antenne : une puce StarChip pourrait faire le voyage en vingt années. À l'arrivée, les puces se « réactiveraient » pas, mais elles renseigneraient à tout allure le système formé par Titane et toutes ses éventuelles planètes, en quelques minutes seulement, envoyant au passage des images qui mettront 4,37 années à revenir jusqu'à nous.

L'aspect « idiot » de la mission Starshot, c'est que son intérêt scientifique est très limité. Les choses que les astronomes voudraient ap-



- ◆ Et toujours des articles rédigés par les meilleurs spécialistes du domaine pour un plaisir de lecture renouvelé

L'AVENTURE DES SCIENCES CONTINUE !

**Rendez-vous le 24 mai 2017
chez votre marchand de journaux**

Disponible également sur pourlascience.fr



L'intrication quantique est-elle un trou de ver ?

Juan Maldacena

Réconcilier enfin relativité générale et physique quantique ? Un rêve de physiciens qui prendrait corps avec une nouvelle théorie : l'intrication quantique de deux trous noirs correspondrait à la formation d'un trou de ver reliant les deux astres.

La physique théorique regorge de notions étonnantes, mais deux des plus étranges sont certainement l'intrication quantique et les trous de ver. La première est un phénomène purement quantique, dans lequel deux objets (en général des particules subatomiques) ont des propriétés directement corrélées même si de grandes distances les séparent et qu'aucun lien physique ne semble exister entre eux. Quant aux trous de ver, prédits par la théorie de la relativité générale, ce sont des raccourcis qui connecteraient des régions éloignées de l'espace-temps, par exemple deux trous noirs distants. Ces dernières années, avec plusieurs autres physiciens, j'ai suggéré que ces deux concepts *a priori* si différents sont peut-être liés. À partir de calculs portant sur des trous noirs, nous nous sommes rendu compte que l'intrication de la physique quantique et les trous de ver de la relativité générale pourraient constituer deux facettes d'un même phénomène. Et nous pensons que cette similitude s'étend à des situations qui ne se limitent pas aux trous noirs.

Nous n'en sommes qu'aux prémices de cette idée, mais si elle se confirme, elle aura des conséquences profondes sur notre compréhension du monde. En effet, elle suggère par exemple que l'espace-temps lui-même émergerait de l'intrication de constituants microscopiques plus fondamentaux. Elle laisse aussi penser que la relation entre objets intriqués (et qui ont longtemps été considérés comme n'ayant pas de lien physique entre eux) serait moins « magique » qu'elle n'apparaît.

DEUX TROUS NOIRS, situés à grande distance l'un de l'autre, pourraient être reliés par un trou de ver, d'après les équations de la relativité générale. En s'inspirant de certains résultats de la théorie des cordes, des physiciens pensent que les trous de ver et l'intrication quantique sont deux aspects d'un même phénomène.

Malcum Goatin, Moarunna Design

■ L'AUTEUR



Juan MALDACENA est physicien théoricien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis. Il est connu pour ses contributions à l'étude de la gravitation quantique et de la théorie des cordes.

Une compréhension approfondie de cette relation entre intrication et trous de ver aboutira peut-être à une piste pour unifier la physique quantique et la relativité générale et ainsi pour développer une théorie quantique de la gravitation. En effet, à ce jour, la physique quantique, qui décrit notamment les interactions subatomiques, et la relativité générale, qui rend compte de la dynamique de l'espace-temps et de la gravitation, sont incompatibles. Or une théorie quantique de la gravitation est nécessaire pour explorer les instants les plus reculés de l'histoire de l'Univers et l'intérieur des trous noirs.

De façon étonnante, les idées d'intrication quantique et de trous de ver remontent toutes deux à des articles écrits en 1935 par Albert Einstein et ses collaborateurs. Ces articles traitent de phénomènes très différents, et Einstein n'a probablement jamais imaginé qu'il pourrait y avoir entre eux un rapport. Et ce d'autant plus que, pour le célèbre physicien, l'intrication quantique traduisait l'existence de problèmes fondamentaux au cœur de la théorie quantique. L'ironie est grande: ce phénomène pourrait aujourd'hui ouvrir une voie pour concilier la théorie de la relativité générale, développée par Einstein en 1915, et la physique quantique.

Des trous noirs aux trous de ver

Afin d'expliquer pourquoi l'intrication quantique et les trous de ver pourraient être apparentés, penchons-nous d'abord sur certaines propriétés des trous noirs. Ces objets de l'extrême sont décrits dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Celle-ci montre comment la matière et l'énergie déforment l'espace-temps et que la force gravitationnelle est une manifestation de la courbure de ce dernier.

Dans la plupart des situations, la courbure de l'espace-temps est très faible. Mais elle devient extrême dans les trous noirs. On distingue alors deux régions: l'intérieur du trou noir, d'où même des objets se déplaçant à la vitesse de la lumière dans le vide (environ 300 000 kilomètres par seconde) ne peuvent s'échapper, et son extérieur, où l'espace-temps est courbé mais d'où les objets et l'information peuvent encore s'échapper. On nomme «horizon des événements» la frontière séparant ces deux régions. D'après la relativité générale, cet horizon n'est qu'une surface immatérielle: un astronaute qui le traverserait ne ressentirait

rien de particulier. Mais une fois qu'il l'aura franchi, le voyageur de l'espace ne pourra plus s'échapper. Il sera condamné à atteindre la région du trou noir où la courbure devient infinie selon la physique non quantique, nommée la singularité interne.

En 1916, soit un an seulement après l'introduction de la relativité générale par Einstein, le physicien allemand Karl Schwarzschild trouva la solution la plus simple des équations d'Einstein décrivant ce qu'on nommera plus tard un trou noir. Cependant, la géométrie de l'espace-temps correspondant à la solution de Schwarzschild – et à la plupart des autres solutions aux équations d'Einstein – était difficile à interpréter jusque dans ses plus subtiles conséquences. En effet, les physiciens maîtrisaient peu à l'époque les mathématiques associées à la géométrie différentielle et à l'invariance sous les changements de coordonnées, qui sont nécessaires pour décrire ce qui se passe au voisinage d'un trou noir.

En 1935, Einstein et son collègue Nathan Rosen, alors à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, découvraient la possibilité qu'existent des trous de ver – on parle aussi de ponts d'Einstein-Rosen (ou ponts ER). Les deux physiciens n'en saisissaient pas toute la géométrie. Il fallut attendre les années 1960 pour que les chercheurs commencent à comprendre le sens de la solution de Schwarzschild et comment un trou de ver y relie en quelque sorte deux trous noirs. Vus de l'extérieur, les deux astres se présentent comme des entités distinctes situées dans des régions différentes de l'espace-temps, mais, d'après les équations, les trous noirs partagent le même intérieur.

Le trou de ver de la solution de Schwarzschild diffère *a priori* des trous noirs qui se forment dans le cosmos suite à l'effondrement d'étoiles massives en cela qu'il ne contient pas de matière, mais uniquement de l'espace-temps courbe. En outre, un trou noir né d'une étoile n'a qu'un seul extérieur, alors que ce trou de ver en a deux. La plupart des chercheurs considèrent la solution de Schwarzschild présentant deux extérieurs comme une curiosité mathématique sans pertinence pour le monde réel. Les physiciens théoriciens se sont néanmoins interrogés sur son interprétation physique.

En 1962, les physiciens américains John Wheeler et Robert Fuller ont montré que le trou de ver reliant les extérieurs des deux trous noirs est instable. Il s'allonge et s'affine à mesure que le temps passe, comme de la

L'ESSENTIEL

- La physique quantique permet l'intrication d'objets éloignés, les mesures réalisées sur l'un affectant celles sur l'autre, même s'il n'y a pas de lien physique entre eux.
- Les équations de la relativité générale, qui décrivent la géométrie de l'espace-temps, autorisent l'existence de trous de ver, des raccourcis entre des régions éloignées.
- Les deux phénomènes pourraient être équivalents. Cette équivalence fournirait une piste pour élaborer une description quantique de l'espace-temps.