

qui est néanmoins suffisant pour traiter toutes les expériences de laboratoire à basse énergie.

Quelle est l'idée du modèle? Rappelons que la difficulté de la gravité semi-classique consiste à extraire de la physique quantique une grandeur que l'on peut définir comme la masse (ou l'énergie) servant de source à un champ gravitationnel classique (sans superposition d'états).

SOUS LES FLASHS

Dans l'approche standard, le seul objet dont on dispose est la fonction d'onde. Dans les approches de réduction dynamique comme le modèle GRW, l'évolution de la fonction d'onde de chaque particule (dictée par l'équation de Schrödinger) est interrompue de façon aléatoire. C'est un «flash», c'est-à-dire un point de l'espace-temps où la superposition est détruite. Le terme de «flash» a été choisi pour mettre en valeur l'aspect éphémère du phénomène (et n'a rien à voir avec une émission de lumière).

Dans notre modèle, la particule devient réelle à l'instant et l'endroit précis du flash. Elle se matérialise et acquiert une masse et crée donc un champ gravitationnel. La particule attire alors vers elle la fonction d'onde du reste du système ou, dit de façon un peu abusive, toutes les autres particules du système. Puis une autre particule se matérialise par un flash et attire vers elle la fonction d'onde du reste... Entre chaque flash, l'évolution quantique usuelle reprend le relais. La gravité se manifeste ainsi de façon saccadée.

Si cette dynamique semble en contradiction avec l'impression que nous avons d'une force gravitationnelle continue, elle est compatible avec les contraintes expérimentales actuelles. Cela s'explique par la faiblesse de la gravitation. Entre deux particules élémentaires, cette force est bien trop petite pour être détectable. Elle n'est observable qu'avec des objets suffisamment macroscopiques dans lesquels les milliards de flashes et d'à-coups gravitationnels qui apparaissent chaque milliseconde donnent aux observateurs l'impression d'un champ gravitationnel évoluant de façon douce et continue.

Un tel modèle, où les flashes sont la source de la force gravitationnelle, présente un certain nombre de signatures expérimentales potentiellement détectables. Par exemple, chaque flash ajoute de l'énergie cinétique aux particules. Cette petite augmentation d'énergie serait observable sous la forme d'un réchauffement mesurable, par exemple, dans des condensats d'atomes ultrafroids.

Faut-il croire à ce modèle? Probablement pas: rappelons qu'il ne fonctionne que dans le régime non relativiste. Il sera intéressant de le réfuter par des expériences pour tester les limites de la physique quantique. Mais en développant ce modèle, notre objectif était surtout de fournir un contre-exemple à l'affirmation selon laquelle une théorie hybride, où la gravité

serait classique, est impossible à construire. Disposer d'un modèle cohérent, même s'il est *in fine* réfuté, permet de prouver que la question de la quantification de la gravité est bien empirique et se tranchera par l'expérience.

Ce modèle peut aussi servir de point de départ pour construire de nombreuses variantes, chacune entraînant des prédictions quantitatives, qu'il sera intéressant de confronter avec les expériences. Cette flexibilité pourrait cependant devenir une faiblesse: si tout résultat expérimental est explicable *a posteriori* en changeant le modèle à la marge, l'approche globale perdra son caractère prédictif. Ainsi, alors que le problème initial était l'impossibilité apparente de construire un seul modèle de gravité semi-classique cohérent, on risque de se retrouver au contraire avec trop de solutions.

TRAQUER LES SIGNATURES

Une autre façon d'aborder le problème de la gravité classique ou quantique est de chercher des signatures expérimentales permettant de tester la pertinence de la gravité semi-classique indépendamment du modèle. En 2017, une équipe menée par Sougato Bose, à l'University College de Londres, a répondu précisément à ce défi. Ils ont proposé une expérience permettant de conclure quant au caractère quantique ou non de la gravitation.

Pour ce faire, ils exploitent une différence qualitative entre toutes les approches semi-classiques cohérentes et une hypothétique théorie quantique. L'idée est d'intriquer une fonction d'onde *via* la force gravitationnelle (voir la figure page ci-contre). Cela n'est possible que si cette force est de nature quantique. Si la force gravitationnelle n'est pas quantique, on n'observera pas d'intrication.

La difficulté de l'expérience de Bose est de trouver une configuration telle que toutes les autres forces, notamment la force de Casimir, liée aux fluctuations électromagnétiques du vide, sont bien négligeables devant la gravité. La surprise est que les avancées techniques requises sont assez raisonnables en termes de microfabrication, de contrôle quantique des systèmes... Des défis, certes, mais sans commune mesure avec celui d'un accélérateur de particules grand comme le Système solaire, qui semble indispensable pour détecter directement des gravitons.

Dans les années 1980, les physiciens pensaient que la nature quantique ou classique de la gravité était une question théorique. Elle sera peut-être expérimentale dans un futur proche. Le résultat le plus intéressant serait de découvrir que la gravité n'est pas quantique. Cela irait à contre-courant de ce que pensent la majorité des physiciens et des efforts consentis ces soixante dernières années. À l'inverse, si la gravité est quantique, une théorie de la gravité quantique n'en deviendra que plus indispensable. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. LALOË, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*, EDP Sciences (2^e éd.), 2018.

A. TILLOY, Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes, *Phys. Rev. D*, vol. 97(2), 021502, 2017.

S. BOSE ET AL., A spin entanglement witness for quantum gravity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. GHIRARDI, *Collapse theories*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta, 2016.

N. GISIN, Stochastic quantum dynamics and relativity, *Helv. Phys. Acta*, vol. 62, pp. 363-371, 1989.

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.

L'AUTRICE



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

La matrice de l'espace-temps

L'intrication quantique de minuscules bribes d'information est-elle la matrice de l'espace et le temps ? Telle est l'audacieuse hypothèse explorée par le projet collaboratif intitulé « It from Qubit ».

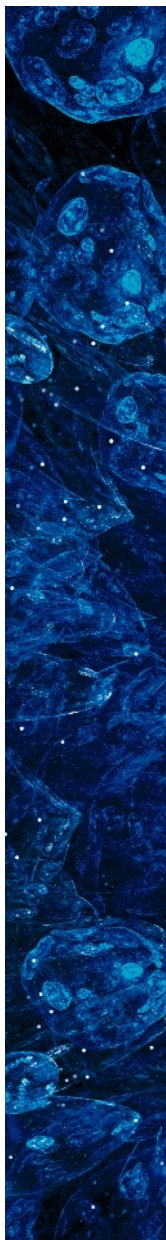
P

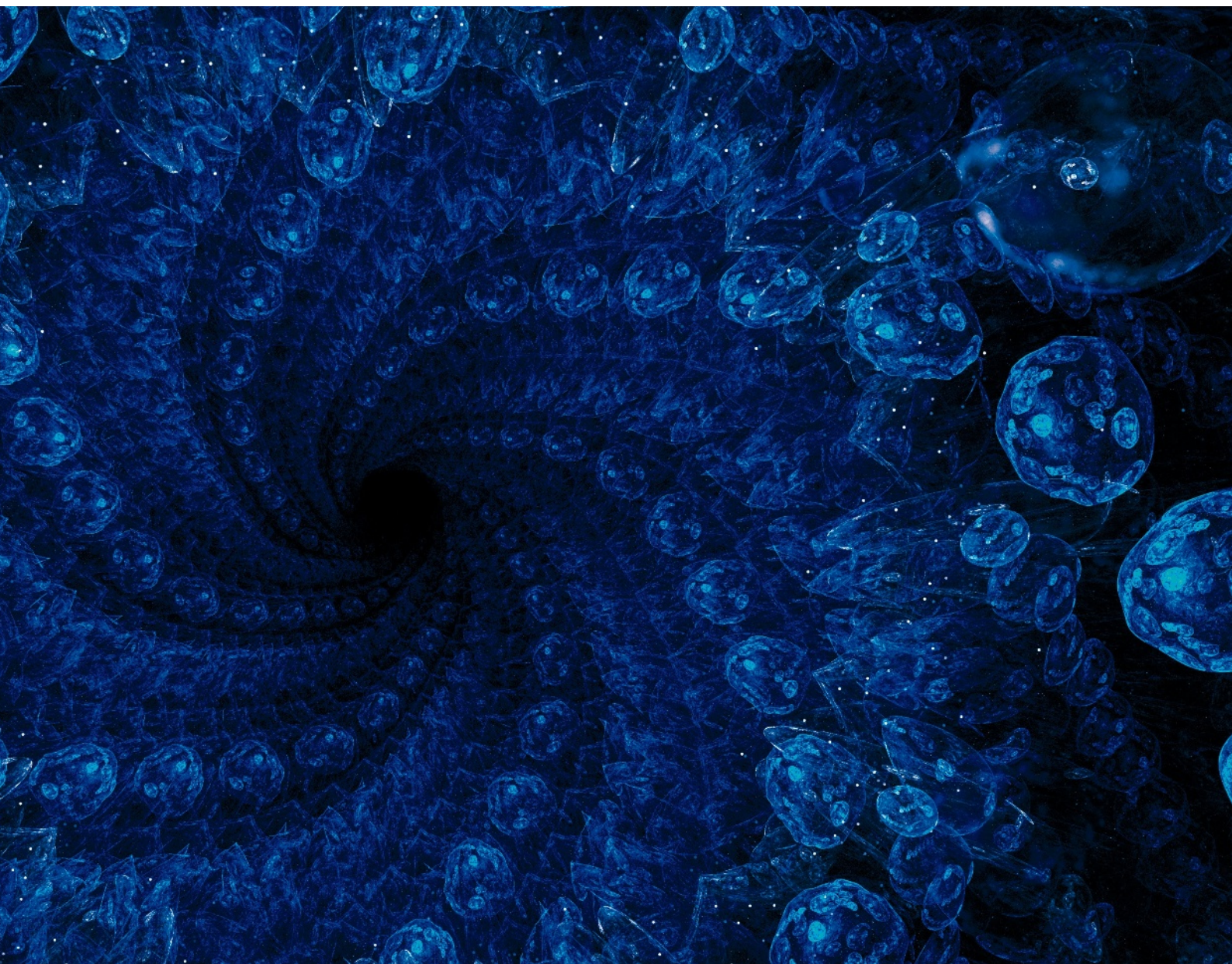
our Shakespeare, «le monde entier est un théâtre». Les physiciens partagent cette idée, mais pour eux, le théâtre est l'espace. Et sur la scène, les acteurs sont les forces et les particules. L'espace, tel qu'on le conçoit le plus souvent, n'est constitué de rien de matériel.

Cependant, les chercheurs remettent en question 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 irrécconciliables, 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 régulièrement 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. Aujourd'hui, avec les progrès en physique quantique, le *bit* est devenu *qubit* et l'idée s'est modernisée.

La réunion *It from Qubit* (IfQ) de 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.»

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. Depuis plusieurs années, la fondation Simons, un organisme privé qui soutient la recherche scientifique, alloue un budget pour financer le projet collaboratif *It from Qubit* ainsi que les recherches et les rencontres des physiciens sur ce sujet. L'excitation ne cesse 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.

UN PONT ENTRE PLUSIEURS DISCIPLINES

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 nomme intrication quantique: une corrélation 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 (*voir Pas d'échappatoire pour l'intrication, par R. Hanson, page 26*). «Selon une idée fascinante, 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, 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, de 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.

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.

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.

L'ÉTOFFE DE L'ESPACE-TEMPS SERAIT TISSÉE PAR L'INTRICATION QUANTIQUE DES ÉLÉMENTS SOUS-JACENTS, QUELLE QU'EN SOIT LA NATURE