

> mesure de l'expansion accélérée de l'Univers. Cette dynamique est bien décrite par les équations de la relativité générale quand elles incluent une constante, la « constante cosmologique », qui prend dans ce cas une valeur positive. Mais dans la théorie des cordes, cette constante est naturellement négative, en contradiction avec les observations. Des tentatives d'adapter la théorie des cordes à une constante cosmologique positive existent, mais restent très controversées. Les expériences qui tranchent de façon définitive sont rares en science : en général, les hypothèses gagnent ou perdent en crédibilité en fonction de l'accumulation d'indices vérifiés ou non. Le fait que la constante cosmologique soit de signe contraire à ce que la théorie des cordes avait indiqué affaiblit la confiance que l'on peut avoir en cette piste.

## UNE VISION QUI SE PRÉCISE

Ces différents exemples de résultats observationnels et expérimentaux nous ont fait progresser sur ce que peut être la gravité quantique. Ainsi, les spécialistes de la théorie des cordes qui, dans les années 1980, pensaient résoudre rapidement le problème de la gravité quantique ont dû revoir leurs objectifs.

L'approche de la gravitation quantique à boucles a été moins ébranlée par ces données récentes. Cependant, les chercheurs travaillant sur cette piste sont moins nombreux et il faut encore fournir un effort considérable pour obtenir des prédictions quantitatives susceptibles d'être confrontées aux expériences.

En particulier, deux phénomènes concentrent une grande partie de l'attention des physiciens. D'abord, la théorie suggère que le Big Bang aurait été un « grand rebond » (*big bounce* en anglais), un résultat obtenu en 2007 par Martin Bojowald, aujourd'hui à l'université d'État de Pennsylvanie. Suivant cette idée, un préunivers aurait été en contraction, s'effondrant sur lui-même. Mais à cause du caractère discret de l'espace, lorsqu'une densité critique a été atteinte, un rebond aurait inversé la dynamique et renvoyé l'Univers en expansion. Le cosmos ne serait donc pas né d'une singularité de densité infinie.

Suivant une idée similaire, les trous noirs pourraient eux aussi « rebondir » en se transformant en « trous blancs » (des objets prédits par la relativité générale et encore non observés). L'un de nous (Carlo Rovelli) et ses collègues travaillent activement à déterminer des signatures observationnelles de ces rebonds, en particulier dans le fond diffus cosmologique (le rayonnement émis par l'Univers quand il n'avait que 380 000 ans) et dans les rayons cosmiques. Les éventuels trous blancs produits par des trous noirs primordiaux pourraient même être une composante de la mystérieuse matière noire.



Quelle que soit la formulation correcte de la théorie de la gravitation quantique, elle est, en tout cas... quantique ! Elle héritera donc des difficultés conceptuelles de la physique quantique, qui seront peut-être même exacerbées. Car ce ne sont pas seulement les particules qui pourront se trouver dans une superposition d'états ou en intrication, mais aussi la géométrie de l'espace-temps elle-même.

Sur la question de l'interprétation de la physique quantique la plus adaptée à la gravité quantique, comme on pouvait s'y attendre, les théoriciens sont divisés. L'idée des mondes multiples est populaire chez une partie des « cordistes », tandis que l'idée que la physique quantique révèle une structure relationnelle de la réalité a plutôt les faveurs des partisans de la théorie des boucles, historiquement plus proche de la relativité générale, laquelle a déjà un fort contenu « relationnel ».

Un petit nombre de théoriciens explorent aussi l'idée que la connexion entre les deux problèmes puisse être plus profonde. Par exemple, le physicien et mathématicien britannique

Les expériences d'Alain Aspect sur l'intrication quantique ont connu de nombreuses améliorations et variantes, dont certaines sont réalisées depuis l'espace. En 2017, un satellite chinois, *Micius*, a servi de source pour des particules intriquées émises vers deux observatoires distants de 1200 kilomètres.

# La gravitation quantique héritera des problèmes conceptuels de la physique quantique

## BIBLIOGRAPHIE

A. Tilloy, **Et si la gravité n'était pas quantique ?**, Pour la Science, n° 495, janvier 2019.

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, EDP Sciences/CNRS Éditions (2<sup>e</sup> édition), 2018.

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, E. N. Zalta (ed.), 2016.

C. Rovelli, **Par-delà le visible : la réalité du monde physique et la gravité quantique**, Odile Jacob, 2015.

Roger Penrose a suggéré que la réduction dynamique puisse être un phénomène d'origine gravitationnel. Cette idée repose sur un fait étrange et intrigant : l'échelle de longueur naturellement associée à la gravitation quantique (la «longueur de Planck») est extrêmement petite et l'échelle d'énergie (l'«énergie de Planck») est extrêmement grande, mais l'échelle de masse naturellement associée à la gravitation quantique (la «masse de Planck») est de l'ordre du microgramme, valeur curieusement proche de celle qui distingue les systèmes «petits» (où les effets quantiques sont manifestes) des systèmes «grands», au comportement classique, non quantique. S'agit-il d'une coïncidence ou de l'indice d'un lien profond entre la gravitation et le problème de l'interprétation de la physique quantique ? Nous ne le savons pas encore.

## UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'EXPÉRIENCES

Des indices utiles pourraient venir d'expériences en laboratoire qui sont à l'étude et seront peut-être réalisées dans un futur proche. Trois équipes ont ainsi récemment proposé des protocoles qui mettront à l'épreuve la nature quantique de la force gravitationnelle (voir l'encadré page 34). Le groupe autour de Markus

Aspelmeyer, de l'université de Vienne, en Autriche, et Sugato Bose, de l'University College, à Londres, et indépendamment Chiara Marletto et Vlatko Vedral, de l'université d'Oxford, ont proposé des expériences capables de mettre en évidence une superposition quantique de deux géométries différentes de l'espace-temps.

L'idée est d'observer l'intrication quantique de deux particules après avoir mis chacune d'elles dans une configuration qui serait la superposition quantique de deux positions différentes. L'intrication serait alors causée par la superposition quantique de deux versions de la géométrie de l'espace-temps, dues aux différentes positions des particules.

Si l'expérience devait montrer que l'espace-temps ne peut pas se mettre dans une superposition quantique d'états, cela indiquerait une relation nouvelle et profonde entre gravitation et quantique, peut-être le long des idées suggérées par Roger Penrose. Si, au contraire, dans le cas que nous pensons le plus probable, l'effet d'intrication est observé, alors celui-ci témoignerait que notre monde n'est pas dessiné sur la toile d'un espace-temps donné : il serait lui-même sujet aux mystères de la physique quantique. ■

Direction des relations avec les entreprises

**cnrs**  
**formation**  
**entreprises**

**Organisme  
de formation continue**



**250 formations technologiques courtes proposées  
par le CNRS dans ses laboratoires de recherche**

pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens



**Domaines de formation**

Big data et IA, génie logiciel, sciences de l'ingénieur, chimie, biologie, microscopie, urbanisme, enjeux sociétaux...  
et plus encore

**+ de 1600 stagiaires en 2018**



Depuis 80 ans, nos connaissances  
bâtissent de nouveaux mondes

Découvrez nos stages sur  
**cnrsformation.cnrs.fr**



contact : [cfe.contact@cnrs.fr](mailto:cfe.contact@cnrs.fr) ou +33 (0)1 69 82 44 55

@CNRS\_CFE

## PASCALE SENELLART-MARDON

est directrice de recherche au CNRS et chercheuse en nanophotonique au Centre de nanosciences et de nanotechnologies du CNRS et de l'université Paris-Saclay. Avec deux ex-étudiants, elle a cofondé la société Quandela qui produit des sources de photons uniques pour l'ordinateur et les communications quantiques, dispositif qui a valu à cette start-up le grand prix i-Lab 2018, concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes.



# L'ordinateur quantique devient un enjeu politique

Depuis plus de vingt ans, l'idée d'ordinateurs opérant sur des bits quantiques et non classiques, qui permettraient de faire des calculs aujourd'hui impossibles, stimule les imaginations et les recherches. S'est-on rapproché de l'objectif? Le point avec Pascale Senellart-Mardon, physicienne à la frontière de la recherche fondamentale et de la technologie.



### **Pouvez-vous nous rappeler ce qu'est un ordinateur quantique ?**

C'est une machine «intriquante», c'est-à-dire un dispositif qui exploite la possibilité de superposer et d'intriquer les états quantiques de plusieurs systèmes physiques – c'est-à-dire de les lier de façon très étroite, spécifique à la physique quantique – afin de mettre en œuvre des calculs hors de portée des ordinateurs actuels.

### **D'où vient la puissance calculatoire particulière que vous évoquez ?**

Pour le faire ressentir, j'aime bien utiliser cette métaphore : rechercher la solution d'un problème revient à essayer de faire traverser un labyrinthe complexe par un personnage.

Si c'est un ordinateur classique qui aide ce personnage, il lui fera, à chaque embranchement, essayer toutes les voies, rebrousser chemin au bout de chaque cul-de-sac, puis recommencer jusqu'à trouver la sortie. Il se peut que, par chance, le personnage trouve vite comment traverser, mais il se peut aussi qu'il meure avant que l'exploration systématique ne lui ait révélé la sortie du labyrinthe...

Si c'est un ordinateur quantique qui assiste le personnage, il le «superposera», à chaque embranchement, à un *alter ego* qui explorera l'autre voie. En d'autres termes, on aura simultanément l'état représenté par le personnage allant à gauche et l'état d'un *alter ego* allant à droite. Résultat : en une passe, l'ordinateur quantique fait essayer en parallèle toutes les voies au personnage. Il construit ainsi un état qui superpose tous les états d'*alter ego* effectuant tous les parcours possibles, y compris celui qui permet de traverser. Un témoin présent à la sortie permettra alors d'extraire, parmi la multitude d'*alter ego*, celui qui aura traversé le labyrinthe – autrement dit la solution au problème posé.

### **Cela revient en somme à une forme de parallélisme massif...**

Exactement, un parallélisme massif et inhérent à une propriété subtile du monde quantique : l'existence d'états qui sont des superpositions de plusieurs états quantiques de base d'un certain système physique. Une autre façon de paralléliser consiste à «intriquer» l'état d'un système physique avec celui d'un autre, l'intrication étant un lien spécifiquement quantique, qui subsiste quelle que soit la distance séparant les deux systèmes. J'insiste sur un point : puisqu'il fonctionne sur un principe différent, l'ordinateur quantique ne remplacera pas l'ordinateur classique, mais il le complétera quand un problème sera hors de sa portée...

### **Quels types de problèmes dépassent l'ordinateur classique ?**

Si nous disposions d'un ordinateur quantique, nous pourrions, de manière générale, résoudre

bien plus vite tous les problèmes d'optimisation, ceux où il faut rechercher une solution parmi un très grand nombre de possibilités. Par exemple, cette capacité pourrait nous aider à développer bien plus vite des molécules thérapeutiques, à réaliser des simulations pour trouver enfin la formule d'un supraconducteur à vraiment haute température, à faire de meilleures prévisions météorologiques, à optimiser les investissements financiers, etc.

Mais l'exemple emblématique est un problème arithmétique : avec un ordinateur quantique, on pourrait décomposer un très grand nombre en ses facteurs premiers beaucoup plus vite. Cela bouleverserait la cryptographie, puisque la sécurité du chiffrement RSA, le plus utilisé aujourd'hui, repose sur l'impossibilité, avec un ordinateur classique, d'effectuer la même tâche en un temps raisonnable.

### **Et où en sommes-nous ? Quels sont les obstacles à surmonter pour construire un ordinateur quantique ?**

Vaste question ! Disons pour commencer que les théoriciens qui développent l'algorithmique quantique supposent de pouvoir disposer d'un certain nombre de bits quantiques, ou qubits (pour *quantum bits*). Un qubit est l'équivalent concret du personnage superposable que j'évoquais plus haut. Un bit classique ne peut valoir que 0 ou 1. Un qubit, lui, a deux états de base notés  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ , et il peut être dans une superposition des deux, c'est-à-dire dans un état de la forme  $a|0\rangle + b|1\rangle$ . Ensuite, l'étape de calcul va créer des liens d'intrications multiples entre différents qubits, liens qui contribuent au parallélisme et permettent d'aboutir au résultat très efficacement.

### **Un ordinateur quantique consiste donc en un étage constitué d'un ensemble de qubits et en un étage qui effectue un calcul ?**

Oui, comme dans un ordinateur classique, dans un ordinateur quantique, le calcul suppose l'assemblage d'un certain nombre de portes logiques, mais les portes logiques quantiques intriquent les qubits entre eux... Aujourd'hui, la difficulté technique essentielle à franchir pour obtenir un ordinateur quantique est triple : 1) disposer d'un grand nombre de qubits ; 2) parvenir à les combiner en des états intriqués ; 3) maintenir la cohérence de ces états assez longtemps pour que les calculs puissent aller à leur terme.

### **Ainsi, il faut d'abord avoir des qubits. Par quelles techniques y parvient-on ?**

Il en existe de l'ordre d'une vingtaine, je crois, mais quatre filières font l'objet d'un développement intense. La plus avancée est celle des ions piégés, dans laquelle deux groupes mènent la course en tête : celui de Rainer Blatt, à >