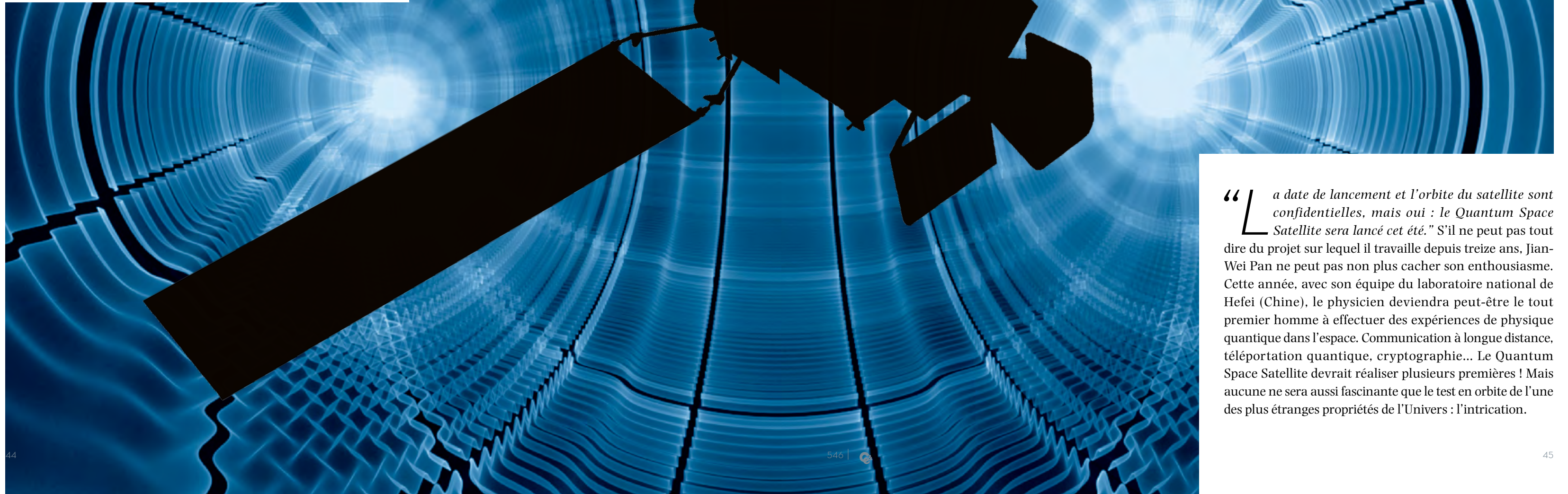


UN SATELLITE POUR TESTER LA PHYSIQUE QUANTIQUE

LA PHYSIQUE DE L'INFINIMENT PETIT SORT DES LABORATOIRES ! CETTE ANNÉE, LES LOIS FONDAMENTALES QUI GOUVERNENT LE MONDE DES PARTICULES SERONT TESTÉES POUR LA PREMIÈRE FOIS DEPUIS L'ORBITE TERRESTRE. ET DÉJÀ, CERTAINS ASTROPHYSICIENS RÉFLÉCHISSENT À DES EXPÉRIENCES À L'ÉCHELLE DE L'UNIVERS.



“ La date de lancement et l'orbite du satellite sont confidentielles, mais oui : le Quantum Space Satellite sera lancé cet été.” S'il ne peut pas tout dire du projet sur lequel il travaille depuis treize ans, Jian-Wei Pan ne peut pas non plus cacher son enthousiasme. Cette année, avec son équipe du laboratoire national de Hefei (Chine), le physicien deviendra peut-être le tout premier homme à effectuer des expériences de physique quantique dans l'espace. Communication à longue distance, téléportation quantique, cryptographie... Le Quantum Space Satellite devrait réaliser plusieurs premières ! Mais aucune ne sera aussi fascinante que le test en orbite de l'une des plus étranges propriétés de l'Univers : l'intrication.

L'intrication ? C'est l'essence même de la description quantique du monde, "une caractéristique qui nous force à nous affranchir complètement des modes de pensée classiques", prévenait le physicien Erwin Schrödinger dès 1935. Elle stipule que, sous certaines conditions, deux objets physiques ne font plus qu'un, même s'ils sont physiquement distincts. Ce qui a des conséquences stupéfiantes : lorsque deux particules sont intriquées, une mesure faite sur l'une influence immédiatement l'autre, même si elles sont séparées par des dizaines de kilomètres. Voire, en théorie, par des milliards d'années-lumière ! En réalité — et c'est bien ce qui rend les choses étranges —, le terme d'influence lui-même est trompeur, car aucun signal ne se propage entre les particules. Elles s'ajustent l'une par rapport à l'autre sans même communiquer. Les

physiciens parlent de *corrélations non locales*, qui semblent surgir comme par magie de l'extérieur de l'espace-temps.

"C'est à Einstein que l'on doit la notion d'intrication", explique Nicolas Brunner, de l'Institut de physique théorique de l'université de Genève. Le père de la relativité générale a joué un rôle majeur dans le développement de la physique quantique. D'abord parce qu'il a découvert le "quantum" de lumière en 1905 (plus tard baptisé *photon*), mais aussi parce que, tout au long des années 1920-1930, il n'a cessé de la critiquer ! "Einstein n'aimait pas la mécanique quantique et ses probabilités. 'Dieu ne joue pas aux dés', disait-il. Il a constamment cherché des incohérences dans la théorie et a finalement été un excellent aiguillon", souligne le chercheur. Lors du congrès Solvay de 1927, qui réunit à Bruxelles les meilleurs physiciens de l'époque, Albert

Einstein ferraille avec le Danois Niels Bohr. Le père de la mécanique quantique réfute une à une toutes ses attaques. Huit ans plus tard, dans un article qu'Einstein signe avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il tient sa revanche.

L'article "EPR" de 1935, aujourd'hui l'un des plus célèbres de la physique du XX^e siècle, expose une expérience de pensée qui entend démontrer que la mécanique quantique est une théorie incomplète. "Il montre en substance que, si on applique les règles de la mécanique quantique, un système de deux photons intriqués, quelle que soit la distance qui les sépare, reste un seul système physique. Chacun des photons réagissant instantanément en fonction de l'autre. Pour Einstein, cette 'action fantôme à distance' est extrêmement bizarre ! Elle s'oppose à tout ce qu'il a bâti", explique Nicolas Brunner. La théorie de la relativité générale, le

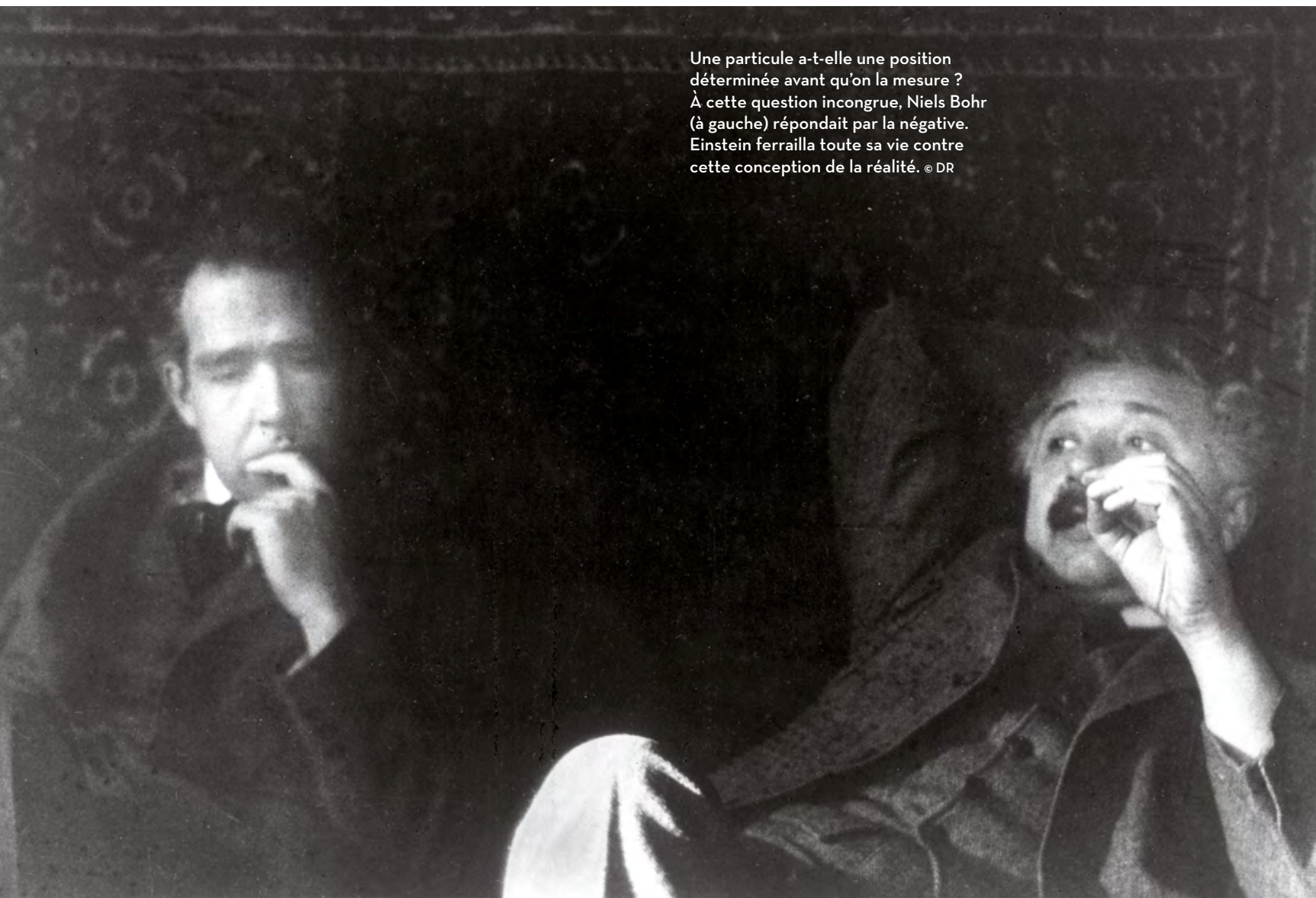
chef-d'œuvre de sa vie, ne consiste-t-elle pas précisément à transformer une action instantanée à distance, presque magique, — la gravitation newtonienne, que Newton lui-même trouvait "absurde"⁽¹⁾ —, en déformation locale de l'espace-temps ? Einstein souligne que, si les particules réagissent de concert, c'est évidemment que *quelque chose* passe de l'une à l'autre. *Quelque chose* que les équations de la physique quantique ne parviennent pas à démasquer. Or, comme il l'écrit, il est évident que "chaque élément de la réalité physique doit avoir une contrepartie dans la théorie physique" ! En d'autres mots, l'intrication révèle la faille de la théorie développée autour de Niels Bohr.

Sauf que celui-ci ne l'entend pas de cette oreille. Einstein a beau écrire en introduction de son article de 1935 que "toute approche sérieuse d'une théorie physique doit prendre en compte la distinction entre la réalité objective, indépendante de toute théorie, et les concepts physiques sur lesquels la théorie opère", Niels Bohr soutient qu'il n'existe pas de réalité objective telle qu'Einstein la conçoit : une réalité dans laquelle une particule posséderait des propriétés intrinsèques indépendantes de l'observateur, et qui de surcroît agirait uniquement de proche en proche, localement. Pour Niels Bohr et ses disciples, le "réalisme local" cher à Einstein est bien étriqué...

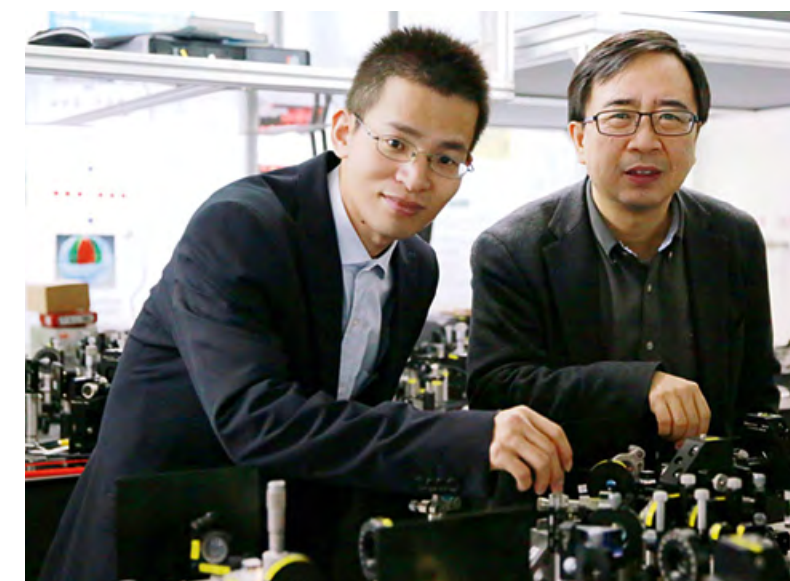
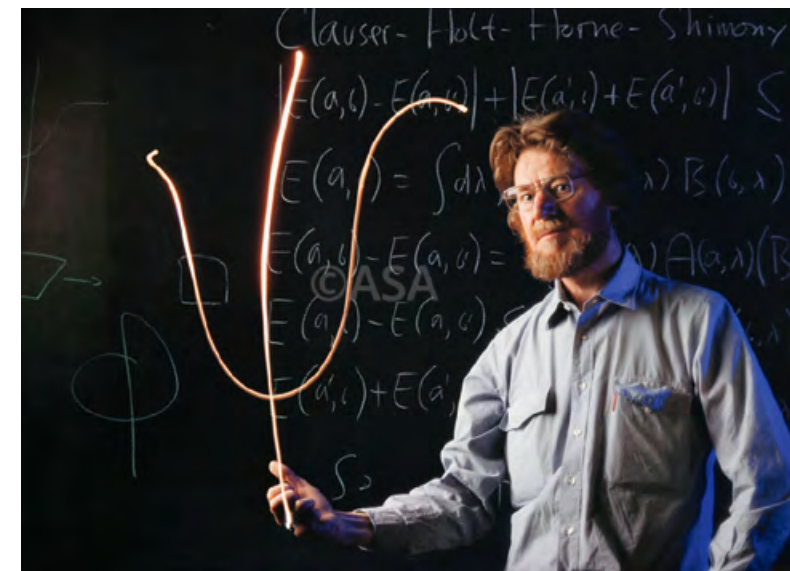
À l'époque, le débat épistolaire qui s'engage entre les deux savants n'émeut guère les physiciens. Après tout, la physique quantique donne d'excellents résultats en pratique, pourquoi perdre son temps avec des débats philosophiques ? Richard Feynman, qui sera prix Nobel en 1965 pour ses travaux en électrodynamique quantique, l'exprime à sa manière : "Je crois pouvoir dire sans trop me tromper que personne ne comprend la mécanique quantique." Ce qui ne l'empêche pas d'y consacrer sa vie ! C'est dire si, lorsque Einstein disparaît en 1955, la question de la signification profonde de la théorie paraît secondaire. On préfère calculer.

John Bell pensait comme Einstein que la physique quantique était une théorie incomplète. L'expérience qu'il proposa en 1964 lui donna pourtant tort quelques années plus tard ! © DR

Jian-Wei Pan (à droite) et son équipe s'approprient à mettre sur orbite une version spatiale de l'expérience de John Bell. La physique quantique triomphera-t-elle une nouvelle fois ? © DR



Une particule a-t-elle une position déterminée avant qu'on la mesure ? À cette question incongrue, Niels Bohr (à gauche) répondait par la négative. Einstein ferrilla toute sa vie contre cette conception de la réalité. © DR





L'intrication quantique offre une étrange image du monde, dans laquelle des particules situées dans différentes régions de l'Univers pourraient être liées par un fil invisible. © Nasa/ESA/C&E Photos

mêlent la physique fondamentale à la technologie de pointe”, souligne Nicolas Gisin, directeur du département de physique appliquée de l'université de Genève. Hélas, elles n'ont cessé de décevoir John Bell lui-même (décédé en 1990).

Car dès les années 1970, les rares expérimentateurs qui se prennent au jeu découvrent que les photons donnent tort... à Einstein ! L'intrication existe bel et bien, et elle permet de dépasser la sacro-sainte limite des 75 % de réussite au jeu de Bell. Le théoricien irlandais met en garde les expérimentateurs : leur manip doit être sans faille pour reproduire réellement son expérience de pensée. En particulier, il leur faut, d'une part, absolument vérifier que les photons intriqués ne peuvent pas communiquer et, d'autre part, s'assurer que la majorité des photons produits est bien observée. Si plus d'un tiers d'entre eux se perd dans la nature, alors l'expérience ne peut pas être concluante... Au début des années 1980, à Orsay, le Français Alain Aspect est le premier à mettre au point une expérience qui répond clairement à la première condition de Bell. Le comptage des photons intriqués est plus difficile : cette faille expérimentale n'est vraiment comblée qu'en 2013. Les deux ont finalement pu être contrôlées ensemble, dans la même expérience de laboratoire, à l'automne 2015.

Fin de l'histoire ? Pas tout à fait. “Depuis une vingtaine d'années, nous essayons de faire sortir l'intrication des laboratoires”, raconte Nicolas Gisin. En 1997, il a été le premier à jouer au jeu de Bell avec des photons intriqués séparés de 10 km. En les faisant circuler à travers des fibres optiques du réseau de télécommunication suisse ! Depuis, le record est détenu par l'équipe de Jian-Wei Pan, qui est parvenue à montrer que l'intrication se conservait sur 144 km. “Si nous testons l'intrication sur des distances de plus en plus grandes, ce n'est pas seulement pour nous amuser. Encore que la notion de jeu soit très importante en physique fondamentale !” précise Nicolas Gisin. Avec son équipe, il espère bien pouvoir utiliser cette étrange propriété pour communiquer des messages cryptés inviolables. “Nous avons aussi des raisons plus fondamentales. D'abord, plus on sépare nos photons intriqués, plus il leur est difficile de s'échanger de l'information, et donc plus l'absence d'influence réciproque est certaine. Ce qui conforte l'existence de l'intrication, explique le physicien genevois. Ensuite, si en réalité les photons intriqués nous trompent en communiquant entre eux plus vite que la lumière — ce qui serait une énorme surprise !

En 1964 cependant, un jeune physicien irlandais du nom de John Bell ressuscite l'article de 1935. Sur son temps libre (s'intéresser à ce genre de sujet est mal vu à l'époque), le chercheur du Cern réfléchit aux fondements de la mécanique quantique. Et il pense avoir trouvé un moyen de trancher entre Einstein et Bohr. Dans un article publié dans une revue de second plan (alors en visite dans des universités américaines, il n'aurait pas osé demander à ses hôtes de payer les frais de publication dans une revue prestigieuse comme *Physical Review*), il expose le principe d'une expérience qui doit montrer, quantitativement, si l'intrication quantique existe ou si elle trahit plutôt le fait que la théorie est incomplète. L'expérience est assez simple : il s'agit d'un petit jeu logique dans lequel la probabilité de gagner ne peut jamais dépasser 75 %, sauf si l'intrication quantique entre en jeu (voir un exemple de jeu de Bell, p. 50). Pour Bell, cela ne fait pas de doute, Einstein doit avoir raison et la théorie de Bohr est sans doute incomplète. Mais la technologie de l'époque ne permet pas de réaliser immédiatement l'expérience.

Depuis, le jeu de Bell est devenu très prisé dans les laboratoires. On sait désormais y jouer avec une paire de photons intriqués (en envoyant un photon sur un cristal, qui vibre en émettant deux), et l'on sait aussi mesurer leurs propriétés, par exemple leur polarisation (la direction dans laquelle ils vibrent). “Ces expériences sont très belles, car elles

—, ce sera plus facile à découvrir sur de grandes distances. Et enfin : la physique quantique nous dit que la distance n'a aucun impact sur la qualité de l'intrication. Il faut le vérifier !”

C'est la raison d'être du Quantum Space Satellite que Jian-Wei Pan doit lancer cette année. En plaçant sur orbite une source de photons intriqués, et en disposant deux récepteurs distants de 1 200 km sur le territoire chinois, il entend démontrer que l'intrication se conserve effectivement sur de grandes distances. Qui plus est à travers l'atmosphère terrestre. “D'après nos calculs, l'intrication sera conservée dans notre expérience satellite. Nous sommes assez confiants”, révèle le chercheur. Il faut dire que, malgré l'idée qu'on peut s'en faire, lancer une expérience de physique quantique dans une fusée ne pose pas de problème. En octobre 2014, un dispositif de création de photons intriqués qui devait être testé sur un nanosatellite a explosé avec la fusée censée l'expédier vers l'ISS. Retrouvé dans les débris, il fonctionnait toujours ! “La plus grande difficulté de notre expérience, c'est en fait de s'assurer que les paires de photons infrarouges émises par le satellite seront bien détectées, une par une, par les télescopes au sol”, souligne Jian-Wei Pan. Ce défi technique explique-t-il qu'il lui a fallu une dizaine d'années pour convaincre sa hiérarchie de lancer le Quantum Space Satellite ?

Si celui-ci tient ses promesses, son palmarès sera en tout cas ébouriffant. Jian-Wei Pan énumère : “Nous voulons réaliser la toute première distribution quantique de clé de chiffrement (2) entre un satellite et la Terre, effectuer la même chose entre la Chine et l'Europe par satellite, réussir une téléportation quantique (3) du sol vers l'espace, et bien sûr réussir l'envoi de particules intriquées depuis l'orbite vers deux sites en Chine, in fine pour tester les inégalités de Bell sur une grande distance.” Non content de tester les fondements de la physique quantique dans l'espace, Jian-Wei Pan espère même que les satellites, d'ici dix ans, pourront réaliser des expériences où se mêleront cette théorie à celle d'Einstein, la relativité générale. “Comme elles sont foncièrement incompatibles, il va y avoir un clash, c'est sûr ! prévient Nicolas Gisin. Ce sera passionnant.”

David Fossé

(1) “Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide, sans la médiation de quelque autre chose pour transporter l'action et la force de l'un à l'autre, cela est pour moi une si grande absurdité qu'à mon avis aucun homme ayant une faculté de réfléchir avec compétence aux problèmes philosophiques ne peut y tomber.” Isaac Newton, cité par Nicolas Gisin dans *L'impensable hasard* (Odile Jacob, 2012).

(2) Technique de cryptographie qui s'appuie sur l'intrication quantique et permet d'assurer des communications cryptées inviolables.

(3) La téléportation quantique consiste à transférer les propriétés quantiques d'un système vers un autre, en utilisant l'intrication. Elle est au cœur des protocoles de communication quantique.



Les quasars, observables jusqu'aux confins de l'Univers, pourraient aider les chercheurs à tester la validité de la physique quantique sur des distances records. © Nasa/ESA/C&E Photos

LES QUASARS À LA RESCOURSSE ?

La physique quantique est vraiment correcte, ou bien les expérimentateurs qui jouent au jeu de Bell sont-ils victimes d'une vaste conspiration ? Andrew Friedman n'est pas un grand paranoïaque, mais il se pose sérieusement la question. Avec ses collègues du MIT et de l'université de Chicago, l'astrophysicien s'est mis en tête de tester une faille logique du jeu de Bell souvent négligée : et si les détecteurs mis en œuvre dans ces expériences étaient “programmés” pour donner, ensemble, des réponses qui mimeraient celles de particules intriquées ? Il faudrait pour cela que, d'une manière ou d'une autre, ils aient interagi dans le passé... Pour se prémunir absolument d'une telle communication, l'équipe propose d'utiliser des quasars lointains comme générateurs de nombres aléatoires (indispensables dans l'expérience). L'idée est la suivante : si l'on pointe deux quasars situés dans deux régions opposées du ciel, il existe une distance à laquelle — compte tenu de la vitesse limitée de la lumière —, ils n'ont pas jamais pu communiquer. Et ce, depuis la naissance de l'Univers. “Utiliser de tels quasars assurerait l'indépendance totale des deux générateurs de nombres aléatoires nécessaires au jeu de Bell”, explique Andrew Friedman. Son équipe et lui viennent de se voir octroyer près de 800 000 \$ de la National Science Foundation américaine pour tester cette idée.