

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Révisseuses: Maud Bruguère, Anne-Rozenn Jouble

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Lucas Gierczak

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuel

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Charline Buché

Cheffe de produit: Eléna Delanne

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétariat général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro: William Rowe-Pirra

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements
Pour la Science - 19 rue de l'Industrie - BP 90053
67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)

France métropolitaine: 79 euros - Europe: 95 euros

Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American», dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à «Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Italie

Taux de fibres recyclées: 0%

«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: Ptot 0.008kg/tonne

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.



10-32-2813 / Certifié PEFC / pefc-france.org



LOÏC MANGIN
Rédacteur
en chef adjoint

Le pantalon de Schrödinger

En juin 2001, un hebdomadaire vantait une invention des laboratoires Hagggar, installés à Dallas, aux États-Unis: le «pantalon de Schrödinger». L'objet, quantique, serait simultanément un vêtement décontracté et une tenue de soirée. Pratique! Las, la parution était *The Onion*, un journal parodique américain. Nos pantalons resteront longtemps classiques. Cependant, qu'un tel média s'empare d'un sujet *a priori* difficile d'accès en dit long sur les promesses et les attentes que suscite la physique quantique.

Et cette fois, elles sont bien réelles. Nous sommes bien à l'aube d'une révolution quantique, la deuxième en fait. La première était fondée sur la meilleure compréhension du comportement des électrons, des atomes, de la lumière... et s'est traduite par la mise au point de toute l'électronique moderne, des GPS, de l'IRM, des lasers et des ordinateurs classiques, et même par la première détection d'ondes gravitationnelles.

Un bilan somme toute plus qu'honorable, mais peut-être bien mince par rapport aux espoirs mis en la seconde révolution quantique. Celle-ci se développe sur les propriétés les plus contre-intuitives de la physique quantique, la superposition d'états et l'intrication. Une fois maîtrisés ces phénomènes, et ils le sont de plus en plus, ce numéro en atteste, c'est, entre autres, tout le paysage de nos communications (le pilier de notre civilisation), ordinateurs et internet, qui en sera bouleversé. La face du monde en sera assurément changée.

À côté de ces applications annoncées, l'histoire nous rappelle que chaque révolution comporte son lot d'imprévus, de surprises, d'idées folles qui se concrétisent et envahissent notre quotidien. Alors pourquoi pas un «pantalon de Schrödinger»... ■

SOMMAIRE

POUR LA
SCIENCE
HORS-SÉRIE

N° 107

Mai-Juin 2020

La nouvelle RÉVOLUTION QUANTIQUE

Constituez
votre collection
de *Hors-Séries*
Pour la science
Tous les numéros
depuis 1996

pourlascience.fr



P. 6

Repères

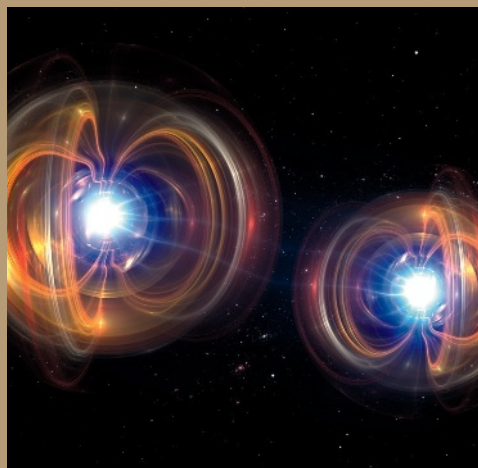
Définitions, grands principes, schémas...
l'indispensable pour apprécier ce numéro.

P. 10

Avant-propos

ALAIN ASPECT

« J'étais loin d'imaginer
cette explosion d'idées
d'applications autour
de l'intrication ! »



UN MONDE TOUJOURS PLUS QUANTIQUE...

P. 16

Une efficacité déraisonnable ?

Étienne Klein et Carlo Rovelli

Centenaire, la physique quantique
est au cœur des technologies modernes.

P. 26

Pas d'échappatoire pour l'intrication

Ronald Hanson et Krister Shalm

Selon Einstein, des variables cachées expliquent
l'intrication quantique. Il n'en est rien.

P. 36

Un pont entre deux mondes

Tim Folger

On comprend mieux la transition du monde
quantique à la réalité classique du quotidien.



... MAIS UNE RÉALITÉ QUESTIONNÉE

P. 46

La physique quantique sans gravité

Antoine Tilloy

Et si la gravité n'était pas quantique? Reprenons alors les bases de la physique quantique.

P. 54

La matrice de l'espace-temps

Clara Moskowitz

L'intrication quantique de bribes d'information est-elle la matrice de l'espace et du temps?

P. 60

Le darwinisme quantique à l'heure des tests

Philip Ball

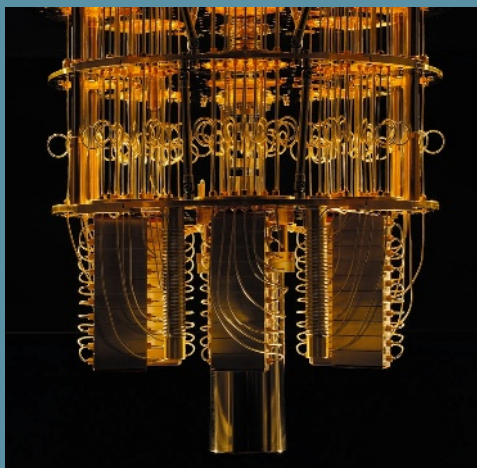
Le darwinisme quantique explique le passage du monde quantique à la réalité classique.

P. 66

L'ami de Wigner, un paradoxe mis à l'épreuve

Sean Bailly

Une expérience de pensée aide à mieux comprendre le rôle de l'observateur.



L'ORDINATEUR ULTIME

P. 78

La course aux qubits

Tristan Meunier

Plusieurs types de structures sont en lice pour équiper les futurs ordinateurs quantiques.

P. 86

Suprématie quantique : le guide pratique

Kevin Hartnett

De quoi parle-t-on vraiment lorsqu'on prétend avoir atteint la «suprématie quantique»?

P. 92

Une suprématie contestée

Kevin Hartnett

Google et IBM s'opposent sur l'idée de «suprématie quantique». Qui a raison?

P. 96 Entretien

Inventer l'internet du futur

Stephanie Wehner par Natalie Wolchover

À quoi ressemblera le réseau qui reliera les ordinateurs quantiques?

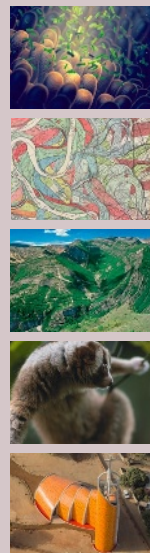
P. 102 Entretien

« Les Chinois ont mis un grand coup d'accélérateur avec des moyens considérables »

Pascale Senellart-Mardon

P. 108

À lire en plus



RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P. 110

Rebondissements

Et si la matière noire n'existait pas? • Collisions, π et ordinateur quantique • Le microbiote, maître ès épigénétique • Le mystère du carbone perdu •

P. 114

Données à voir

Et au milieu coule un fleuve

P. 116

Les incontournables

Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

P. 118

Spécimen

Les ultrasons du loris lent

P. 120

Art & Science

Église, termites et coquillages

Petit guide de survie dans un monde quantique



En 1871, les physiciens avaient toutes les raisons d'être optimistes. Avec la mécanique classique et la théorie de l'électromagnétisme, ils pensaient décrire la quasi-totalité des systèmes physiques, à quelques petits détails près... où se cachait le diable ! Ainsi, quand ils calculaient le spectre de la lumière émise par un objet chaud (un corps noir) en se plaçant dans le cadre classique, les résultats prédisaient une absurde « catastrophe ultraviolette », une intense émission de rayons ultraviolets et X, susceptible d'aveugler quiconque regarderait, par exemple, un poêle à charbon ! La solution vint près de trente ans plus tard, quand Max Planck donna l'expression correcte du spectre du corps noir. Toutefois, sa démonstration s'appuyait sur une hypothèse tellement étrange que lui-même la renia pendant plusieurs années : il avait dû admettre que son corps noir n'émettait de l'énergie que par petites bouffées, par « quanta ». Cette singulière hypothèse allait se révéler extrêmement fructueuse et donner naissance à la physique quantique. En un siècle, elle est devenue la théorie fondamentale des particules de matière constituant les objets de l'Univers et des champs de force animant ces objets. Pour efficace qu'elle soit, elle n'en met pas moins en scène des idées et des concepts parfois déroutants. Petit tour d'horizon.

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

En s'appuyant sur les travaux d'Einstein sur l'effet photoélectrique, Louis de Broglie a postulé que la lumière est constituée d'ondes lumineuses et de corpuscules (des photons). De là est née la notion de dualisme entre onde et particule : tous les objets physiques présentent des propriétés parfois d'ondes et parfois de corpuscules. Les unes ou les autres se manifestent selon le dispositif de mesure.

SUPERPOSITION

Un système microscopique, par exemple un atome – qui est comme la lumière à la fois onde et particule – peut, à l'instar d'une onde, se trouver en plusieurs endroits à la fois ; il peut aussi être en même temps dans des états d'énergies ou de polarisation différentes.

INDÉTERMINISME

Conséquence de la dualité onde-corpuscule, la physique quantique est de nature probabiliste. L'onde associée à une particule est en fait une onde de probabilité (la fonction d'onde) : son intensité correspond à la probabilité de trouver la particule en un endroit ou dans un état donné. Plus encore, le principe d'incertitude de Heisenberg édicte que plus notre connaissance d'une certaine propriété d'un système est précise, plus notre connaissance de certaines autres propriétés du même système sera imprécise. La détermination précise de la position d'une particule, par exemple, implique que celle de sa vitesse devient imprécise.

FONCTION D'ONDE

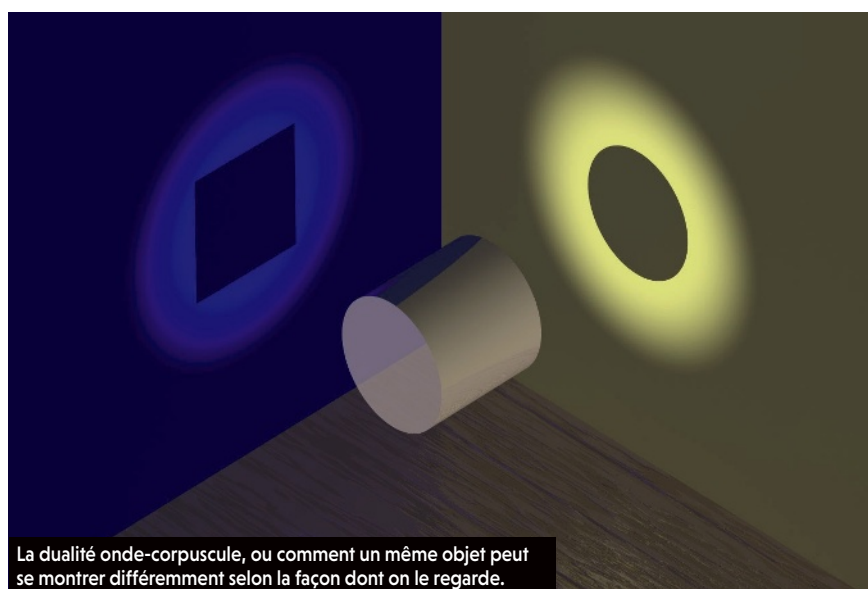
Calculée à partir de l'équation de Schrödinger, elle indique la probabilité de trouver une particule en un point. Ce n'est qu'en faisant la mesure que l'on sait où elle se trouve. Outre la position, cette incertitude concerne également d'autres grandeurs physiques comme la vitesse, l'énergie, le moment cinétique, le spin...

EFFONDREMENT DE LA FONCTION D'ONDE, OU DÉCOHÉRENCE

Une superposition quantique de multiples états ne peut se maintenir qu'avec un système isolé. Toute tentative d'observation ou de mesure d'une particule entraîne automatiquement son effondrement en un état unique, autrement dit le choix d'une possibilité.

INTRICATION

Les parties d'un système quantique ayant interagi, par exemple une paire de photons, restent liées : les mesures faites sur l'une ont un effet immédiat sur les résultats des mesures faites sur l'autre, même quand ces parties sont très éloignées. Les états des deux parties sont corrélés sans qu'aucun signal ne soit échangé entre elles.



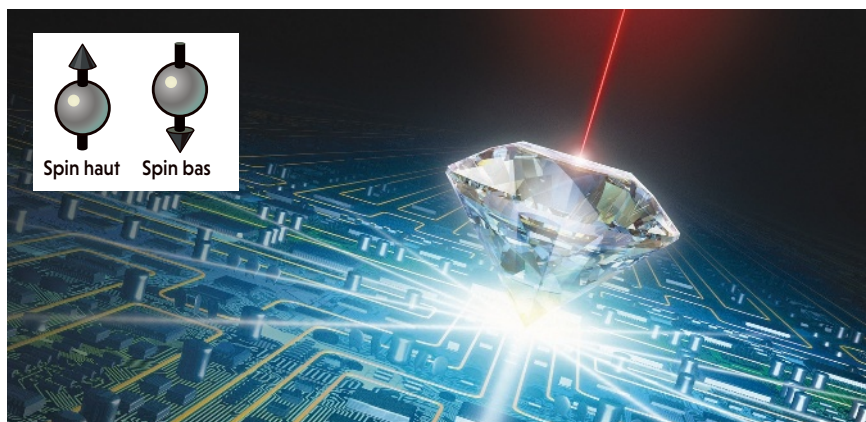
La dualité onde-corpuscule, ou comment un même objet peut se montrer différemment selon la façon dont on le regarde.

INÉGALITÉS DE BELL

Farouche opposant à l'idée d'intrication quantique, Albert Einstein a en 1935, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, formulé ses objections sous la forme d'un paradoxe (noté EPR). Selon ces trois physiciens, l'intrication quantique implique soit que les deux particules échangent des informations qui se propagent plus vite que la lumière (ce qui violerait la théorie de la relativité restreinte), soit que la physique quantique est incomplète et que des « variables cachées », inconnues, donnent l'illusion de l'intrication quantique. En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a formalisé la question du paradoxe EPR sous la forme d'inégalités qui portent son nom, et qui sont violées si l'intrication est vraie. Des expériences menées par Alain Aspect en 1982 ont montré que les inégalités de Bell sont bien violées.

CHAT DE SCHRÖDINGER

En 1935, l'Autrichien Erwin Schrödinger, peu satisfait par l'idée de superposition, imagina pour en montrer l'absurdité une situation macabre. Un chat est enfermé dans un local contenant un flacon de gaz mortel, un compteur de radioactivité et un atome radioactif. Si le compteur détecte de la radioactivité, un mécanisme casse le flacon, et le chat meurt. Le compteur, macroscopique, ne peut que mesurer l'un des deux états classiques possibles de l'atome : « désintégré » ou « non désintégré ». Or, dans le monde quantique, un atome peut fort bien se trouver dans un état superposé combinant les états « désintégré » et « non désintégré ». Ainsi, si l'atome radioactif est dans cet état superposé, l'existence du mécanisme brisant le flacon implique que le chat se trouve dans un état combinant la possibilité d'être mort et celle d'être vivant.



SPIN

Les électrons, beaucoup d'autres particules et même des défauts dans le réseau d'atomes de carbone d'un diamant ont un moment cinétique intrinsèque, le spin, un peu comme s'ils étaient de minuscules billes en rotation. À ce spin est associé un moment magnétique. On représente les spins et les moments cinétiques par des vecteurs, orientés vers le haut pour une bille tournant d'ouest en est, et vers le bas dans le sens inverse (voir ci-dessus). Par leur spin, les électrons se comportent comme de minuscules aimants. Depuis 1998, les têtes de lecture des disques durs utilisent, pour détecter les microscopiques domaines magnétiques du disque représentant les

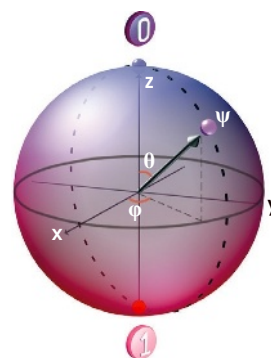
bits d'information, un effet lié au spin, l'effet de « magnétorésistance géante », dont la découverte a valu, en 2007, le prix Nobel de physique au Français Albert Fert et à l'Allemand Peter Grünberg.

GRAVITATION

C'est la seule force de la nature qui ne soit pas décrite de façon cohérente dans le cadre de la physique quantique. Les théoriciens cherchent à résoudre ce problème et à unifier théorie quantique et gravitation, en particulier dans le cadre de la théorie des cordes ou de la gravitation quantique à boucles.

LE BIT QUANTIQUE (QUBIT)

Un bit quantique, ou qubit, est l'unité quantique d'information, l'équivalent du bit classique. Cependant, alors que ce dernier ne peut avoir comme valeur que 0 ou 1, le qubit peut représenter deux états à la fois, 0 et 1, chacun avec une certaine probabilité. On représente les états quantiques d'un qubit avec la sphère de Bloch. N'importe lequel de ces états s'écrit mathématiquement sous la forme $a|0\rangle + b|1\rangle$, où a et b sont des nombres complexes dont la somme des carrés des modules ($|a|^2 + |b|^2$) est égale à 1. On peut donc réécrire a et b en fonction de deux angles (θ et ϕ) qui suffisent à définir n'importe quel état d'un qubit ($\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{-i\phi}\sin(\theta/2)|1\rangle$). L'ensemble des états, placé dans un repère (x, y, z) , forme une sphère, un état ψ étant représenté par une flèche allant du centre de la sphère à un point de sa surface. Une mesure de l'état du qubit donne soit 0, soit 1, avec une probabilité dépendant de la latitude θ du point sur la sphère : si $\theta = \pi/2$ par exemple, on mesure une fois sur deux 1 et une fois sur deux 0. Toutes les opérations sur le qubit correspondent à des rotations du vecteur sur la sphère.



COMMENT A-T-ON SU

une collection dirigée par
Étienne Klein

Roland Lehoucq

Pourquoi
le Soleil brille

Loïc Bollache

Comment pensent
les animaux

Alain Riazuelo

Pourquoi la Terre
est ronde

François Parcy

L'histoire secrète
des fleurs

« Si on veut donner le goût des sciences,
il faut d'abord leur donner du goût. »

Étienne Klein

humensciences

humensciences.com



ALAIN ASPECT



« J'étais loin d'imaginer cette explosion d'idées d'applications autour de l'intrication! »

La physique quantique est sous les feux de l'actualité, avec par exemple, l'équipe chinoise qui a établi une communication quantique entre un satellite et des stations terrestres. Qu'est-ce que cela vous inspire ?

Alain Aspect : Ce résultat démontre une fois de plus que l'intrication quantique entre photons semble capable de persister, aussi grande soit la distance. Pour atteindre plus de 1 000 kilomètres, l'équipe chinoise utilise une source émettant depuis un satellite pour s'affranchir des problèmes d'absorption, c'est une très bonne idée. Parce que le problème de la portée des communications optiques est celui de l'absorption du signal. Dans les fibres optiques, au-delà de quelques dizaines de kilomètres, il est très atténué. Pour y remédier, dans le domaine des télé-

BIO EXPRESS

15 juin 1947
Naissance à Agen.

1980
Première expérience montrant la violation des inégalités de Bell.

1992
Directeur de recherche au CNRS, à l'Institut d'optique, à Orsay.

2005
Médaille d'or du CNRS.

2010
Prix Wolf.

2013
Médaille Niels Bohr.

communications optiques classiques, on a d'abord, dans les années 1980, utilisé des répéteurs optoélectroniques qui détectaient le signal optique, le transformaient en signal électronique, le réamplifiaient et le réémettaient sous forme d'impulsion lumineuse. Puis advint une rupture technologique avec l'amplificateur à erbium, où le signal optique est amplifié directement dans la fibre elle-même. Cette innovation a révolutionné le monde des télécommunications classiques.

Dans le domaine quantique, on rêve d'une telle avancée. Mais aujourd'hui, aucun équivalent quantique de l'amplificateur à erbium n'existe sous une forme efficace. Pour un signal de cryptographie quantique, *a priori* à l'abri de tout espionnage, la Chine avait proposé une première solution un peu brutale. Dans une connexion quantique qu'elle avait établie entre Shanghai et Pékin (plus de 1 000 kilomètres à vol d'oiseau), un blockhaus a été bâti tous les 50 kilomètres. À l'inté-

rieur de chacun, l'information quantique est convertie en information classique puis à nouveau sous forme quantique. Et pour éviter tout risque d'espionnage lorsque le signal est mis sous forme classique, chaque bâtiment est gardé par un bataillon de l'armée chinoise...

Moins gourmande en soldats et plus intéressante est l'idée d'utiliser un satellite, situé à quelque 500 kilomètres d'altitude, de sorte que la plus grande partie du parcours des photons émis vers la terre se fait dans le vide. Seuls les 10 kilomètres d'épaisseur de l'atmosphère donnent lieu à une absorption. C'est à ce jour l'unique méthode pour envoyer deux photons intriqués à 1200 kilomètres l'un de l'autre d'une traite. Je trouve ça très beau.

Faisons un peu de pédagogie. À quoi cela peut-il servir ?

Alain Aspect : À la cryptographie quantique ou à la téléportation quantique à grande distance, dans les deux cas en utilisant une paire de photons intriqués. Pour la cryptographie quantique, il s'agit de distribuer à deux partenaires, Alice et Bob, deux suites identiques de 0 et de 1, qui serviront de clés de cryptage et de décryptage. Les corrélations quantiques entre photons intriqués garantissent que les clés sont identiques, et qu'il est impossible, pour des raisons fondamentales, d'en obtenir une troisième copie.

Quant à la téléportation quantique, l'idée – très subtile – est la suivante. L'état d'un objet quantique est décrit, en mathématiques, par un vecteur dans ce que l'on appelle un espace de Hilbert. Cependant, la totalité de l'information sur cet état (disons les composantes de ce vecteur) est inaccessible à la mesure; seule une partie de l'information (une projection du vecteur sur une base de dimension limitée) est à portée d'instrument. Dans ces conditions, il semble *a priori* impossible de connaître la totalité de l'état quantique d'un objet et d'envoyer l'information correspondante à distance. Eh bien la téléportation quantique, fondée sur l'intrication, permet de contourner ce problème!

Avec une paire de photons intriqués, on peut d'abord faire interagir le premier photon avec le système dont on veut téléporter l'état. Cet état se trouvera copié sur le second photon de la paire au terme d'une série d'opérations. De la sorte, l'état quantique aura voyagé. Cependant, il y a un prix à payer. L'état quantique du système de départ, téléporté, a été complètement modifié à l'issue des opérations: il a été «coupé-déplacé» sur le second photon

et a été effacé du système de départ. Mais c'est quand même extraordinaire si l'on songe que l'état a été déplacé en totalité alors qu'on ne peut pas le connaître.

Cette téléportation rend possible un internet quantique, en tout cas un réseau d'ordinateurs quantiques qui échangeraient des états quantiques. Ce n'est pas la téléportation de matière, à la Star Trek, mais celle d'une information quantique. L'idée est fascinante.

Un problème encore mal résolu réside dans la nécessité d'une mémoire quantique, indispensable pour rendre vraiment efficace la téléportation quantique, car il faut garder en attente, jusqu'à la fin du processus, l'information partielle sur l'état quantique transférée «instantanément» lors de l'interaction avec le premier photon. Une mémoire quantique efficace aurait bien d'autres applications: elle permettrait de développer des répéteurs quantiques basés sur des photons intriqués, permettant de régénérer le si-

Michel Devoret, maintenant à Yale. Mais il faut distinguer l'annonce tonitruante de Google de la conférence donnée par John Martinis à l'institut de technologie de Californie, dans un contexte universitaire: il est à juste titre très fier de son résultat, mais il ne le survend pas.

Peut-on rappeler ce qu'est la suprématie quantique ?

Alain Aspect : D'abord, le vocabulaire fait polémique. Le terme «suprématie» implique l'élimination de tous les concurrents. Je préfère parler d'«avantage», c'est-à-dire une supériorité seulement dans certains types d'applications. Quoi qu'il en soit, avantage ou suprématie, c'est l'idée théorique selon laquelle on pourrait mettre en œuvre le parallélisme massif offert par l'intrication quantique pour réaliser des calculs beaucoup plus vite qu'avec une machine classique. Par «beaucoup plus vite», il faut entendre exponentiellement plus vite, au vrai sens scientifique du terme.

Pour éviter tout risque d'espionnage, chaque bâtiment est gardé par un bataillon de l'armée chinoise

gnal quantique atténué dans les fibres optiques sans passer par un signal classique intermédiaire. Avec de tels répéteurs quantiques, on pourrait dépasser la limite des 100 kilomètres sans recourir à des satellites. Mais il n'existe pas encore de très bonne mémoire quantique, bien que sur le plan fondamental, rien ne semble s'y opposer.

L'autre grande information qui fait un peu de bruit est l'annonce de Google sur la suprématie quantique qu'ils auraient atteint. Comment y voir clair ?

Alain Aspect : Il faut d'abord dire que l'expérience réalisée est remarquable. On la doit à un scientifique exceptionnel, John Martinis, de l'université de Californie, à Santa Barbara, aux États-Unis, qui a longtemps travaillé avec Daniel Estève, un des leaders des supraconducteurs dans son laboratoire du CEA à Saclay, ainsi qu'avec

Prenons l'exemple de la factorisation des nombres entiers. Pour un nombre de 100 chiffres, un ordinateur classique aura besoin d'un temps T , et ce temps doublera pour un nombre de 101 chiffres, et doublera encore pour 102, etc. Le temps croît de façon exponentielle, et c'est cette croissance exponentielle qui permet de se mettre à l'abri des espions au fur et à mesure des progrès des ordinateurs.

Or on peut démontrer qu'en mettant en œuvre un algorithme particulier (celui de Shor) sur un ordinateur quantique, le temps de calcul d'une factorisation croît notablement plus lentement avec le nombre de chiffres. Ainsi, en renversant le point de vue, l'ordinateur quantique va exponentiellement plus vite que l'ordinateur classique.

Démontrer l'avantage quantique consiste à pouvoir dire: «J'ai résolu, avec un système quantique, un problème dont

➤ la résolution demanderait un temps considérablement plus long avec un ordinateur classique. »

C'est ce que revendique Google...

Alain Aspect : Oui, mais, d'une part, le problème qu'ils disent avoir résolu est sans utilité, et, d'autre part, ils n'ont pas préparé eux-mêmes ce problème. Schématiquement, ils ont connecté leurs circuits quantiques et observé un résultat sur une configuration déterminée plus par le système que par eux, et ont mis au défi des ordinateurs classiques de calculer ce résultat... Je reconnaitrai volontiers un avantage quantique le jour, sans doute pas très lointain, où le problème résolu d'une façon beaucoup plus efficace qu'avec un ordinateur classique aura un minimum d'utilité, comme celui du voyageur de commerce (trouver le chemin le plus court passant par plusieurs villes) et sera choisi par un tiers. Aujourd'hui, nous avons une magnifique expérience, mais qui n'a pas dépassé une étape intermédiaire.

Google la présente aussi comme un générateur de nombres aléatoires, mais il y a tellement plus simple pour obtenir un nombre aléatoire avec un système quantique ! Un photon envoyé sur une lame semi-réfléchissante va soit la traverser et être détecté dans la voie transmise, et vous notez le résultat 1, soit être réfléchi et détecté dans la deuxième voie, et vous avez un 0. En recommençant l'opération, vous obtenez un nombre aléatoire, sous forme binaire, aussi grand que vous le souhaitez ! Le comportement du photon est totalement imprévisible, car dans le cas contraire, des variables cachées existeraient dans le système quantique. Or plusieurs expériences, dont celles menées à l'Institut d'optique, montrent que ce n'est pas le cas.

Dans ce domaine, on distingue simulateur quantique et ordinateur quantique. Quelle est la différence ?

Alain Aspect : Elle se situe entre le réel imparfait et le théoriquement parfait. Le domaine du calcul quantique en général a été initié par Richard Feynman en 1982, quand il a réalisé que l'intrication est un phénomène révolutionnaire dont il avait jusque-là sous-estimé l'importance. Dès lors, il lance les premières idées sur le calcul quantique, qui sont d'abord celles d'un simulateur quantique : simuler sur un ensemble de particules quantiques faciles à observer et à manipuler un ensemble de particules intriquées difficiles à observer et à manipuler, et dont il est impossible de calculer le comportement,

comme des électrons dans un matériau. Un des meilleurs exemples de simulateur est un ensemble d'atomes ou d'ions ultra-froids que l'on sait aujourd'hui très bien contrôler et observer avec des lasers.

Les grands progrès qui ont suivi l'article initial de Feynman ont été la découverte de l'algorithme de Shor et d'autres, comme l'algorithme de Grover, qui permet de chercher rapidement un élément dans une base de données. Au milieu des années 1990, ces avancées se sont faites sur la base d'un ordinateur quantique parfait. Aura-t-on un jour un ordinateur quantique parfait et universel ? La réponse est évidemment non. Mais des théoriciens, là encore extrêmement créatifs, ont imaginé des codes correcteurs quantiques d'erreur, analogues à ceux qui existent dans nos ordinateurs classiques. Cette découverte fut une grande surprise puisque beaucoup de spécialistes pensaient que la décohérence empêcherait d'y parvenir.

Mais le coût à payer est très élevé ! Pour simuler un bit quantique parfait avec des bits quantiques réels, même avec les meilleurs disponibles aujourd'hui, il n'en faut pas deux ni même 10, mais 1000, voire 10000. Pour un ordinateur quantique à 100 qubits parfaits, prévoyez probablement un million, peut-être un peu plus, de qubits réels de très bonne qualité. Or, le record du monde est de l'ordre de 50 aujourd'hui.

L'ordinateur quantique universel est-il donc hors de portée ?

Alain Aspect : Ma position sur le sujet ressemble à celle que j'avais il y a quarante ans sur la détection des ondes gravitationnelles. Je regarde le problème en tant que physicien, et je constate qu'aucune loi physique fondamentale ne fait obstacle à sa résolution. C'est bien le cas de l'ordinateur quantique parfait. Rien ne l'interdit, mais quand on contemple les sauts technologiques à accomplir, on ne voit pas bien aujourd'hui à quelle échéance on y parviendra. J'ai l'intime conviction que c'est une affaire de décennies.

Je peux toutefois me tromper. Demain, un progrès inattendu, par exemple dans la compréhension des espaces de Hilbert dans lesquels sont décrites les particules intriquées, peut changer la donne. En attendant, on essaye d'utiliser au mieux les simulateurs quantiques qui fonctionnent avec des qubits imparfaits, et profiter d'une percée conceptuelle due notamment à John Preskill, lui aussi à l'Institut de technologie de Californie (et inventeur du terme de suprématie quantique) : on peut

faire des choses intéressantes avec une évolution des simulateurs quantiques qu'il nomme des *noisy intermediate scale quantum computers* (NISQ)*, c'est-à-dire des ordinateurs quantiques imparfaits de taille intermédiaire. On peut espérer résoudre un certain nombre de problèmes avec des ordinateurs de ce type. Et tout un essaim de start-up se crée sur cette idée.

Que proposent-elles ?

Alain Aspect : L'idée de ces start-up est de reprendre des montages complexes de laboratoire manipulés par plusieurs docteurs en sciences et ingénieurs, de les rendre fiables et faciles d'utilisation par des non-spécialistes afin de résoudre des problèmes d'optimisation, comme celui du voyageur de commerce déjà évoqué et celui, que je trouve particulièrement intéressant, de la grille électrique. Dans une zone où la production d'électricité est décentralisée (centrales nucléaires, photovoltaïque, éolien, hydraulique...) et où la consommation varie selon l'endroit, le moment de la journée, les saisons, il s'agit d'optimiser la distribution pour satisfaire tout le monde.

C'est un problème majeur à l'heure du réchauffement climatique, dont le calcul avec un ordinateur classique est très gourmand en temps. Or la réponse doit être rapide, de l'ordre de la minute. On a des raisons de penser que l'on peut aborder ce genre de problèmes avec des NISQ. Pour ce faire, vous devez maîtriser quelques dizaines de qubits intriqués. C'est le cas, par exemple ici, à l'Institut d'optique d'Antoine Browaeys et son équipe, qui contrôlent une cinquantaine d'atomes de Rydberg intriqués. Une start-up va bientôt commercialiser un tel système pour le mettre à la disposition de clients. Les fournisseurs d'énergie sont intéressés.

D'autres exemples de calculateurs NISQ reposent sur des ions, des circuits supraconducteurs, des photons... et de plus en plus de chercheurs se lancent dans la création de start-up afin de rendre disponibles des machines permettant de résoudre des problèmes réels. Cette démarche est extrêmement intéressante.

D'ailleurs, puisque l'on parle de réchauffement climatique, on peut envisager l'avantage quantique sous un autre angle. Imaginez un ordinateur quantique qui en performance serait équivalent aux machines classiques, mais en consommant cinq fois moins d'énergie. Ce serait aussi un sérieux avantage.

Toutes ces idées sont dans l'air et en cours d'évaluation dans le monde entier, aux États-Unis, au Canada, en Chine, en

Allemagne, en Suède, en France... Et selon moi, d'ici cinq ans, nous saurons si elles ont des chances d'aboutir à des machines vraiment fiables, «presse-bouton», qui pourront se confronter à de vrais problèmes.

Justement, quelle est la situation en France ?

Alain Aspect : Dès que j'en ai l'occasion, je plaide auprès des responsables politiques qui veulent bien m'écouter en leur demandant d'accompagner le mouvement. S'il débouche vraiment sur des applications utiles, ce serait dommage que la France ait raté ce train alors qu'elle a des laboratoires et des chercheurs académiques au meilleur niveau et un certain nombre de start-up en train de démarrer. Pour l'instant, nous n'accusons pas un retard important. Et un grand programme quantique est attendu, suite au rapport «Quantique, le virage technologique que la France ne ratera pas», rédigé par l'ancien PDG de Safran – Jean-Paul Herteman, la députée Paula Forteza et le chercheur Ionadis Kerenidis. Toute une communauté espère une décision rapide.

L'Europe a déjà mis de l'argent sur la table, mais chaque pays développe en plus son propre programme et c'est ce que nous attendons du gouvernement : qu'il débloque rapidement un peu d'argent pour le monde académique et lui permette de rester dans la course, à côté des filières industrielles qui investissent des sommes importantes. Les programmes nationaux apportent une agilité indispensable face aux évolutions rapides du domaine. En six mois, une voie de recherche peut se boucher et une autre, inattendue, s'ouvrir : on doit pouvoir réagir très vite.

En France, il n'est pas nouveau que l'on soit bon sur le plan académique, mais aujourd'hui, la situation est vraiment favorable à l'émergence de start-up en lien étroit avec ces groupes académiques, ce qui se fait depuis toujours aux États-Unis mais qui est relativement inédit dans notre pays. On a vraiment changé d'atmosphère. Des liens entre l'entrepreneuriat et l'université se tissent, se renforcent... et je suis certain que les technologies quantiques vont rapidement avoir des applications concrètes dans plusieurs domaines.

Lequel par exemple ?

Alain Aspect : En métrologie quantique, on peut citer la mesure des accélérations, y compris celle de la pesanteur, par interférométrie atomique avec des atomes ultrafroids. À Bordeaux, Bruno Desruelle,

un de mes anciens étudiants, a fondé la start-up μ Quans avec Arnaud Landragin et Philippe Bouyer, deux chercheurs restés dans le domaine académique, pour développer des appareils capables de mesurer la gravitation. Avec un poids inférieur à 100 kilogrammes et quelques dizaines de centimètres de longueur, ces

La découverte des codes correcteurs quantiques d'erreur fut une surprise, la plupart des spécialistes pensant que la décohérence empêcherait d'y parvenir

dispositifs ont une précision égale à celle d'appareils traditionnels pesant une tonne et mesurant un mètre cube. Ils sont donc mobiles et transportables partout où l'on souhaite connaître la structure du sous-sol (géophysique, exploration minière, génie civil...) par le biais d'une mesure locale de la gravitation.

Une telle diversité d'applications était-elle envisageable au début de votre carrière ?

Alain Aspect : Absolument pas ! Dans les années 1970, c'est par pure curiosité intellectuelle que j'ai commencé à m'intéresser à l'optique quantique, c'est-à-dire l'étude des propriétés de la lumière dans lesquelles intervient la physique quantique. Cela m'a permis de développer au début des années 1980 une expérience montrant que l'intrication quantique est aussi extraordinaire que la théorie le prévoit. Tellement extraordinaire qu'Einstein lui-même avait du mal à l'admettre.

À mes débuts, c'était un pur problème conceptuel : peut-on observer les propriétés de l'intrication qui défient tellement l'intuition ? J'étais loin de pouvoir ne serait-ce qu'imaginer cette explosion d'idées d'applications autour de l'intrication. J'en suis aujourd'hui émerveillé !

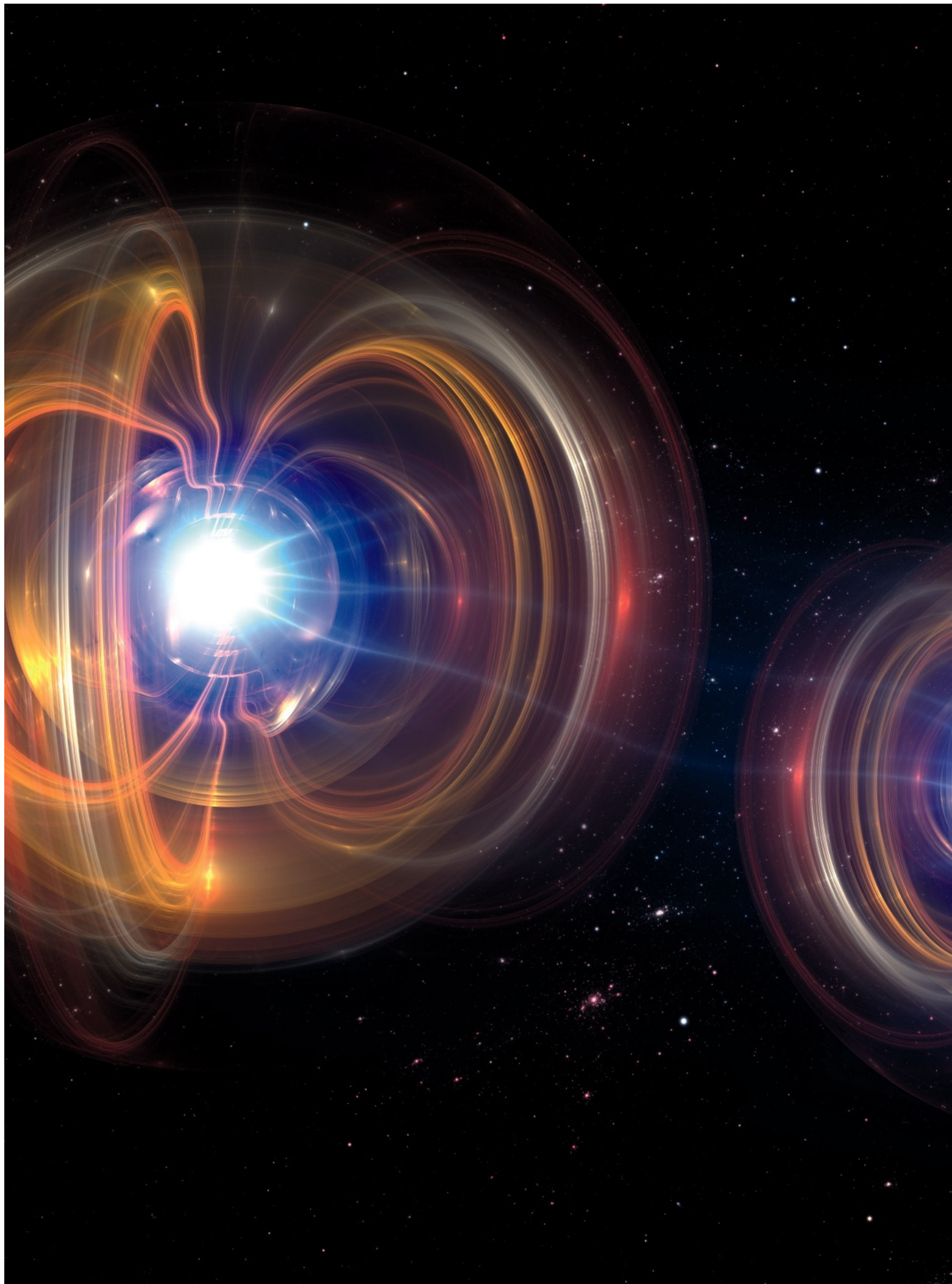
PROPOS RECUEILLIS PAR LOÏC MANGIN

BIBLIOGRAPHIE

Deux MOOC (EN Anglais).
Quantum Optics 1: Single Photons: <http://bit.ly/3cGPfNH>
Quantum Optics 1: Two photons and more: <http://bit.ly/2VTq5p6>

Les intrigantes intrications DU monde quantique, podcast, *La Conversation scientifique*, France culture, 29 février 2020. <http://bit.ly/2vOIZTs>

Site d'Alain Aspect: <http://bit.ly/38w8S7F>





© Shutterstock.com/Jurik Peter

UN MONDE TOUJOURS PLUS QUANTIQUE...

Jamais une théorie scientifique n'a été aussi confortée par l'expérience. Centenaire, la physique quantique a maintes fois été poussée dans ses retranchements et a toujours dépassé l'épreuve. Nous vivons dans un monde résolument quantique, et les objets qui nous entourent (ordinateurs, smartphones, GPS...) en sont la preuve. Mais on peut encore aller plus loin. Même l'intrication, l'une des plus étranges propriétés prévues par la théorie quantique, par laquelle deux éléments qui ont interagi sont liés par-delà les distances, est désormais incontestablement confirmée par des expériences. Plus encore, on commence même à comprendre comment on passe du monde microscopique et quantique, où règnent les probabilités, au nôtre, classique et macroscopique, bien plus tangible.

L'ESSENTIEL

● La physique quantique a démontré son efficacité pour décrire des phénomènes et prédire les résultats d'expériences.

● Mais que dit-elle vraiment du monde? Son interprétation pose toujours des difficultés, et diverses voies sont explorées pour les résoudre.

● Un autre défi est de construire une théorie quantique de la gravitation, capable de décrire les premiers instants de l'Univers et le cœur des trous noirs.

LES AUTEURS



ÉTIENNE KLEIN est directeur du laboratoire Larsim du CEA, à Saclay, au sud de Paris.



CARLO ROVELLI est professeur à l'université de la Méditerranée, chercheur au Centre de physique théorique, à Marseille.

Une efficacité déraisonnable ?

Centenaire, la physique quantique est au cœur des technologies modernes. Mais malgré sa spectaculaire fécondité, son interprétation garde quelques zones d'ombre.

Le chat à la fois mort et vivant de Schrödinger symbolise tout le caractère contre-intuitif de la physique quantique et les progrès qui restent à faire pour comprendre les lois étranges de cette théorie.



D

ans les années 1920, le comportement des atomes et des particules déroutent les physiciens. Pour expliquer certains phénomènes, comme le rayonnement du corps noir, ils développent des concepts radicalement nouveaux qui les conduisent à penser autrement la matière et ses interactions. Une décennie d'effervescence créatrice et d'intense labeur a suffi pour qu'un petit nombre d'entre eux fondent l'une des plus belles constructions intellectuelles de tous les temps, la physique quantique. Celle-ci rencontra rapidement un vif succès, grâce à la confirmation de ses prédictions expérimentales précises. Elle est aujourd'hui omniprésente dans notre quotidien: dans nos ordinateurs, dans nos téléphones, dans nos écrans...

Pourtant, malgré son succès incontestable, la physique quantique reste énigmatique par bien des aspects, notamment parce que cet édifice théorique exige un travail d'interprétation, que les physiciens ont les pires difficultés à mener à bien. Il faut dire que la théorie quantique pose des questions à la fois inédites et vertigineuses: comment comprendre son formalisme? Est-ce un simple outil pour prévoir les résultats d'une expérience? Quel statut confère-t-elle au hasard qui intervient dans la détermination des résultats? Donne-t-elle accès à une description de la réalité du monde?

Si la physique quantique troubla tant, c'est parce qu'elle échappait au cadre d'interprétation de la physique classique. À tout système, la physique classique attache des propriétés qui appartiennent en propre au système (par exemple, tel vélo est bleu et roule à 30 kilomètres par heure), et n'attribue pas de rôle fondamental à l'opération de mesure, qui n'est que l'enregistrement neutre et passif de grandeurs existant objectivement (le vélo est bleu, qu'on le regarde ou non).

RENTREZ DANS LE RANG

La physique quantique, elle, ne semble pas partager un «engagement ontologique» aussi fort. D'abord, elle n'accorde aux particules ni position, ni trajectoire, ni forme bien déterminées. Ensuite et surtout, elle renonce à faire usage de l'idée, pourtant élémentaire, consistant à attribuer aux particules une réalité qui serait pleinement indépendante des moyens de l'observer. Était-ce le signe que le cadre d'interprétation classique devait être définitivement abandonné? Ou bien, au contraire, qu'il manquait à cette nouvelle physique des ingrédients dont la prise en compte la ferait «rentrez dans le rang»?

C'est autour de ces questions que les physiciens Niels Bohr et Albert Einstein se sont amicalement, mais fermement, opposés l'un à l'autre (*voir la photo page 19*). Bohr considérait que la physique quantique obligeait à bouleverser les théories rendant compte du rapport que nous avons avec ce qu'on nomme par commodité (sans en dire davantage) «la réalité». Einstein pensait, lui, qu'il était prématuré de conclure de la sorte. Le père de la relativité n'a jamais prétendu que la physique quantique fût une théorie fautive, mais, selon lui, une théorie physique ne doit pas être jugée à l'aune de sa seule efficacité opératoire: elle doit aussi dépeindre les structures intimes du réel. Or, à ses yeux, la physique quantique, malgré ses spectaculaires et incontestables succès expérimentaux, ne faisait pas cela de façon satisfaisante.

Dans le cadre de la théorie quantique, un système physique est décrit par un objet mathématique, la fonction d'onde. Celle-ci s'écrit, en général, comme la somme de plusieurs fonctions représentant chacune un état particulier, affecté d'un certain coefficient. On est alors face à une «superposition» d'états possibles, une situation sans équivalent en physique classique. La théorie stipule alors que connaissant la fonction d'onde, on ne peut en général pas déterminer le résultat d'une mesure, mais seulement calculer les probabilités d'obtenir tel ou tel résultat. Et parmi tous les résultats possibles *a priori*, un seul est sélectionné, au hasard, par l'opération de mesure. Cette dernière entraîne une «réduction des possibles» qui s'effectue d'un coup et de façon aléatoire.

POUR EINSTEIN, LE MONDE RÉEL EXISTE OBJECTIVEMENT, QUE NOUS L'OBSERVIONS OU NON

Or, selon Einstein, une bonne théorie physique se doit d'éliminer le hasard, sinon de ses constructions, du moins de ses principes. Ensuite, Einstein tenait à une certaine forme de «réalisme», l'idée d'un monde réel dont les plus minuscules parcelles existent objectivement, que nous les observions ou non. Or, constatant que ce réalisme-là est compromis par la physique quantique, il voulut démontrer qu'il existait des éléments de réalité que cette théorie n'est pas en mesure d'appréhender. Cette dernière serait donc incomplète, d'où cette impression d'une description fondée sur le hasard et ne décrivant pas un monde qui existe indépendamment de l'observation.

Bohr, lui, répugnait à considérer qu'il existât une réalité objective, indépendante de l'appareil de mesure. Selon lui, ce qu'une théorie physique peut prétendre décrire, ce sont seulement des phénomènes incluant dans leur définition le contexte expérimental qui les rend manifestes. La physique quantique n'avait donc pas besoin d'être amendée. Cette vision est à la base de ce qu'on nomme l'interprétation de Copenhague (et ses différentes nuances), portée par Bohr, Werner Heisenberg et d'autres, et qui a longtemps été considérée comme la seule façon de concevoir la physique quantique.

QUAND EINSTEIN ET BOHR S'OPPOSENT

Le débat entre Einstein et Bohr démarra en 1927, à Bruxelles, lors d'un congrès Solvay, une conférence scientifique qui réunissait les plus grands physiciens de l'époque. Einstein chercha une contradiction dans les «relations d'incertitude de Heisenberg», qui concernent le comportement de particules quantiques individuelles. Ces relations fondamentales de la théorie quantique s'expriment sous la forme d'inégalités qui relient deux grandeurs dites «complémentaires», comme la position et la vitesse. Une conséquence de ces inégalités est qu'il n'est pas possible de connaître parfaitement les grandeurs complémentaires en même temps. Mais à chaque offensive, Bohr parvint à contrer les arguments d'Einstein.

En 1935, la discussion reprit autour d'un article signé par Einstein et deux de ses collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Ce texte comportait une objection concernant non plus le comportement d'une seule particule, mais celui d'une paire de particules – dont les propriétés sont si étroitement liées que l'on parle de «particules intriquées» – et s'intitulait: «La

description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée comme complète?» Question à laquelle les trois chercheurs répondaient par la négative.

Leur raisonnement s'appuie sur trois hypothèses. La première stipule que les prédictions de la physique quantique sont justes. Il n'est pas question pour Einstein et ses collègues de considérer que la physique quantique est une théorie fautive, ils questionnent juste sa cohérence interne.

Deuxième hypothèse: aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière, conformément à la relativité restreinte. Ce critère de localité implique tout simplement que lorsque deux événements sont si lointains dans l'espace et si rapprochés dans le temps que la lumière n'a pas le temps de les relier, aucun de ces deux événements ne peut agir sur l'autre; ils se déroulent alors «chacun dans leur coin», exactement comme si l'autre n'avait pas eu lieu. Et si on applique le critère de localité aux particules, il implique que chacune transporte avec elle, c'est-à-dire «localement», les propriétés qui vont déterminer les résultats des mesures.

Enfin, le dernier critère, l'hypothèse de réalité, indique que si l'on peut prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette grandeur. La valeur trouvée n'est ni une hallucination ni un fantôme: un élément de réalité lui correspond nécessairement, et le formalisme se doit de l'intégrer, sans quoi il ne serait pas complet.

L'ARGUMENT EPR SÈME LE TROUBLE

Ensemble, ces trois hypothèses précisent ce qu'il faut entendre par «objet réel» en restant proches d'un certain bon sens et des idées de la physique classique. Forts de ces arguments, Einstein, Podolsky et Rosen considérèrent une expérience de pensée s'appuyant sur un système constitué de deux électrons intriqués, créés par un processus liant leurs vitesse et position dans des rapports préétablis. Plus précisément, les deux électrons partent dans des directions opposées à la même vitesse. En mesurant la vitesse de la particule 1, on en déduit la vitesse de la particule 2 au même instant *sans altérer son état*; en vertu du critère de réalité, la vitesse de la particule 2 est donc un élément de réalité. En procédant de même avec la position, on arrive à la conclusion que la position de la particule 2 est également un élément de réalité. Or, mises ensemble, ces deux assertions contredisent le principe d'indétermination de Heisenberg, selon lequel la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être déterminées simultanément.

Cette contradiction amena les trois chercheurs à conclure que la physique quantique n'est pas en mesure de rendre compte de ces

éléments de réalité (ici la position et la vitesse). Il faut donc considérer la théorie comme incomplète: des variables qui n'apparaissent pas dans son formalisme mathématique porteraient ces informations, ces éléments de réalité. Ou alors, il faudrait imaginer que la position et la vitesse ne sont pas des éléments de réalité; et que la mesure opérée sur la particule 1 déterminerait, à distance, instantanément et comme par miracle (par «télépathie» dira Einstein), les grandeurs relatives à la particule 2. Cette solution était impossible aux yeux des trois physiciens, car elle violait l'hypothèse de localité et les lois de la relativité restreinte. La physique quantique serait alors une théorie dite «non locale».

Pour mieux comprendre le problème, choisissons une illustration plus proche de l'expérience commune. Supposons que nous disposions de deux cartes, l'une bleue, l'autre rouge, et que nous les placions chacune dans une enveloppe scellée. Mélangeons les deux enveloppes à l'abri de tout regard, puis donnons-en une à Paul et l'autre à Julie. Lorsque Paul ouvre son enveloppe, il découvre la couleur de sa carte. Le résultat qu'il obtient est évidemment corrélé avec celui qu'obtiendra Julie: si la carte de Paul est bleue, celle de Julie sera rouge, et inversement. Comment interpréter cela? Tout simplement en considérant que les couleurs respectives des cartes de Paul et Julie

Niels Bohr et Albert Einstein ont contribué à la fondation de la physique quantique et à son interprétation. Ils ont confronté leurs visions antagonistes lors de débats qui ont profondément marqué les développements de cette théorie et qui ont permis de mieux la comprendre.



étaient déjà fixées avant l'ouverture de l'enveloppe: cette action n'a fait que révéler une situation qui n'était pas encore connue de Paul, mais qui était déjà parfaitement déterminée.

En d'autres termes, ce n'est pas le fait que Paul prenne connaissance de la couleur de sa carte qui a fixé cette couleur, ni qui aurait ensuite déterminé la couleur de la carte de Julie par quelque information transmise de la première enveloppe vers la seconde. Les deux cartes se trouvent avoir la couleur qu'elles ont en vertu de la cause commune qui les a fixées lorsqu'elles ont été glissées dans les enveloppes.

C'est ce type d'arguments que l'hypothèse de réalité d'Einstein condense: il y a un «élément de réalité physique» associé à la couleur de la carte de Julie puisque, sans ouvrir l'enveloppe qu'elle a entre les mains, elle est capable de la connaître. Il lui suffit de demander à Paul le résultat qu'il a obtenu et d'en tirer la conclusion.

COMPLÈTE OU NON ?

Le cas des cartes de Paul et Julie est évidemment un problème de nature classique, où la part probabiliste prend sa source dans le «mélange statistique» initial des cartes. Dans le cas d'un système quantique de deux électrons intriqués, c'est la superposition des états qui entre en jeu. Mais ce qu'Einstein et ses deux collègues démontrent, c'est que l'application du critère de réalité à la théorie quantique conduit au «paradoxe EPR» (d'après les initiales des trois signataires). Plus précisément, pour garantir le réalisme et éviter des conflits de cohérence internes à la théorie, il doit exister des variables additionnelles qui ne sont pas contenues dans la physique quantique. Ce formalisme est ainsi pris en flagrant délit d'incomplétude. Il doit donc exister, selon Einstein et ses collègues, un niveau de description plus fin de la réalité que celui proposé par la physique quantique.

Dès la publication de cet article, Bohr décida de défendre la physique quantique telle qu'elle est. Mais il comprit vite que le raisonnement d'Einstein était extrêmement subtil et que sa réfutation serait délicate. Bien sûr, la réponse qu'il apportait à la question posée (la physique quantique est-elle complète?) était un oui sans équivoque, mais son argumentation semblait plutôt confuse. Incapable d'identifier la moindre erreur dans l'argumentation EPR, Bohr fut réduit à affirmer que les preuves fournies par Einstein n'étaient pas assez solides et sa critique porta essentiellement sur le critère de réalité de son interlocuteur.

À vrai dire, ces débats n'intéressaient guère les physiciens, car ils n'avaient pas d'incidence sur leur façon d'utiliser le formalisme de la physique quantique, c'est-à-dire de faire des calculs et des prédictions qui étaient toujours en accord avec les mesures. La fécondité de la théorie quantique était même si spectaculaire

- et si vaste qu'il n'apparaissait ni nécessaire ni utile de mieux la comprendre.

Mais en 1964, au Cern, près de Genève, John Bell, physicien nord-irlandais très soucieux, lui, de clarté conceptuelle, vint modifier radicalement la situation et transforma le débat philosophique en un problème de physique.

UNE ISSUE GRÂCE À JOHN BELL

Il proposa des situations expérimentales où la physique quantique donnerait des prédictions différentes d'une théorie prétendant la compléter en respectant l'hypothèse de localité, grâce, par exemple, à l'introduction de «variables cachées locales» (voir *Pas d'échappatoire pour l'intrication*, par R. Hanson, page 26). La controverse entre Bohr et Einstein allait pouvoir être tranchée au laboratoire!

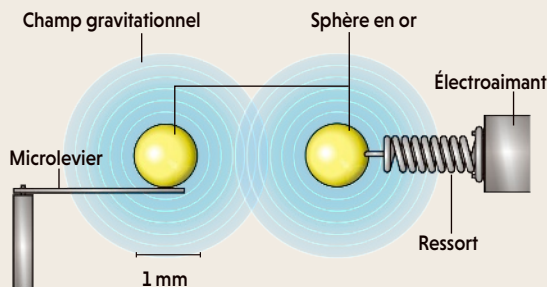
Ce fut le cas au début des années 1980, quand une équipe de l'institut d'optique d'Orsay, dirigée par Alain Aspect, mena à bien une série d'expériences avec des photons intriqués, qui montra qu'en l'occurrence, ce sont les prédictions de la physique quantique telle qu'elle

est qui sont justes, et non celles des théories concurrentes. En définitive, c'est toute la classe des théories réalistes locales qui se trouvait là réfutée. Par la suite, d'autres expériences plus précises et plus élaborées, menées avec des photons mais aussi avec des particules de matière, démontreront elles aussi, de façon irréfutable, l'absence d'échappatoires pour les théories à variables cachées locales.

On doit alors admettre le caractère non local de la théorie quantique, mais qu'est-ce que cela signifie? Cela implique que dans certaines situations, deux particules qui ont interagi dans le passé ont des liens que leur distance mutuelle, aussi grande soit-elle, n'affaiblit pas. Ce qui arrive à l'une des deux est irrémédiablement associé (intriqué) à ce qui arrive à l'autre, par l'entremise d'une connexion étrange, sans équivalent dans le monde ordinaire, car elle ne résulte pas de la transmission d'une information à distance. La paire formée par les deux particules a des propriétés globales que n'ont pas les particules individuelles. Ce phénomène étrange impose de renoncer définitivement à

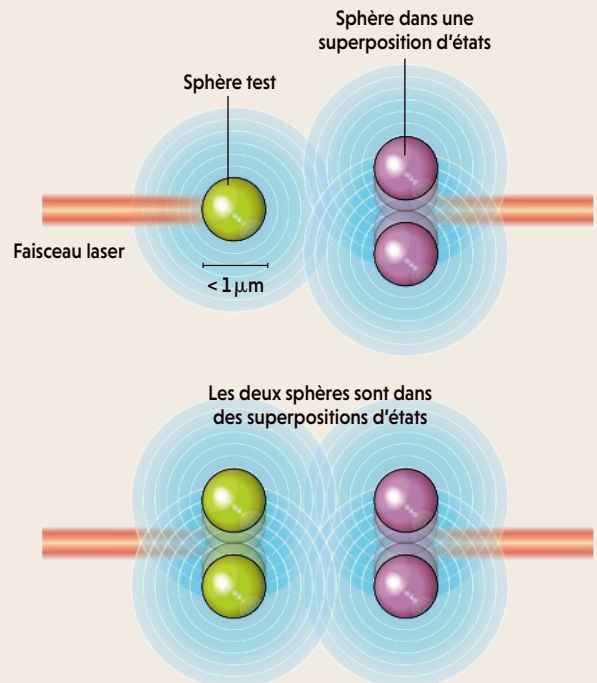
DES EXPÉRIENCES DE GRAVITÉ QUANTIQUE

Pour comprendre comment concilier la force gravitationnelle et la physique quantique, plusieurs équipes de physiciens conçoivent des expériences capables de mesurer des champs gravitationnels avec une précision extrême afin d'y déceler des comportements quantiques. Ils espèrent voir ainsi des particules dans des configurations de superposition quantique de deux positions différentes et des effets d'intrication.



UNE ÉTAPE PRÉLIMINAIRE : MESURER LE CHAMP GRAVITATIONNEL

Dans l'expérience proposée par le physicien Markus Aspelmeyer, l'idée est de mettre une sphère dans un état de superposition de deux positions spatiales différentes simultanées et de voir si le champ gravitationnel associé à cette masse est aussi séparé en deux. Pour observer de tels effets, il faut d'abord un dispositif capable de mesurer avec précision le champ gravitationnel de petits objets (*ici des sphères en or*). Dans cette expérience, un électroaimant couplé à un ressort fait vibrer une sphère. Par la seule force gravitationnelle, la seconde sphère, posée sur un microlevier (cantilever) similaire à ceux utilisés dans les microscopes à force atomique, devrait osciller. Les physiciens espèrent mesurer cet effet infime.



L'EXPÉRIENCE DE MARKUS ASPELMEYER

L'équipe mettra une sphère (*violette*) dans un état de superposition de deux positions grâce à un laser. Le champ gravitationnel de cette sphère sera alors aussi dans une superposition d'états et aura deux distributions spatiales. Comment la sphère test (*verte*) interagira-t-elle avec ce champ? L'interaction pourrait détruire la superposition d'états, ce qui serait un signe de la nature classique de la force gravitationnelle. Ou bien la superposition pourrait persister et conduire à un système intriqué des deux sphères, ce qui confirmerait la nature quantique de la force gravitationnelle.

interpréter la physique quantique dans le sens des idées d'Einstein. En particulier, il n'y a aucun moyen de compléter la physique quantique en termes de variables cachées locales.

Ce résultat a été une grande avancée dans la compréhension de la physique quantique. Néanmoins, de nombreuses difficultés conceptuelles subsistent que des physiciens et des philosophes continuent d'explorer. Pour certains, la physique quantique, dans son interprétation par l'école de Copenhague, est moins une théorie physique qu'un ensemble efficace de « recettes » pour calculer des résultats de mesures. Mais, comme le soulignait déjà Bell, cet ensemble de recettes n'en est pas moins, lui-même, problématique. Pourquoi l'observateur joue-t-il un rôle si important ? Pourquoi l'acte de la mesure provoque-t-il l'effondrement de la fonction d'onde en l'une de ses composantes ? Ou encore, pourquoi un système macroscopique ne manifeste-t-il jamais une superposition d'états ?

Depuis plusieurs décennies, les physiciens tentent de dépasser l'interprétation de

Copenhague pour traiter ces difficultés. En explorant plusieurs pistes.

Évoquons les quatre directions principales explorées pour résoudre les difficultés conceptuelles de la physique quantique. Une première approche reprend le principe des variables cachées, c'est-à-dire l'idée que la physique quantique est incomplète et qu'il existe des variables structurellement impossibles à mesurer. Pour être cohérente avec les phénomènes d'intrication (et donc avec les expériences d'Alain Aspect), la dynamique de ces variables doit bien sûr être non locale.

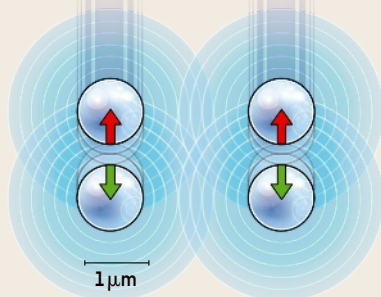
ONDES PILOTES ET MULTIVERS

La meilleure des théories à variables cachées est la théorie de Broglie-Bohm, d'abord suggérée par le physicien français Louis de Broglie en 1927 sous le nom de théorie de l'onde pilote, en s'inspirant du principe de la dualité onde-corpuscule qu'il avait énoncé quelques années plus tôt. Elle a ensuite été précisée en 1952 par l'Américain David Bohm. Dans ce cadre, chaque particule est décrite par sa position dans l'espace et par une onde associée, qui est la variable cachée et qui guide le mouvement de la particule. Dans cette théorie, réaliste au sens d'Einstein, l'évolution est continue sans effondrement de la fonction d'onde. L'indéterminisme quantique est alors simplement la manifestation de notre ignorance des variables cachées.

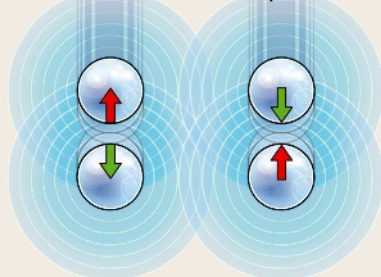
Une deuxième voie, particulièrement osée, est l'interprétation des mondes multiples, qui repose sur des idées publiées en 1956 par le physicien américain Hugh Everett. À chaque mesure, toutes les prédictions possibles se réalisent, mais dans des mondes différents. Il n'y aurait donc jamais d'effondrement de la fonction d'onde. La réalité serait beaucoup plus vaste que celle à laquelle nous avons accès. L'indéterminisme serait la manifestation de notre ignorance sur notre localisation dans cette réalité élargie : toutes les prédictions de la théorie seraient réalisées, mais nous occuperions une certaine « branche » de la réalité, de sorte que nous ne verrions qu'un seul des résultats parmi tous ceux *a priori* possibles.

Une troisième possibilité est que la physique quantique n'est pas cohérente en soi, car elle ne serait qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale à la dynamique complexe et non linéaire que nous n'avons pas encore directement observée. Cette dynamique est réalisable de différentes façons. Par exemple, les physiciens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber ont proposé en 1986 un mécanisme, dit « de réduction dynamique », qui provoque de façon aléatoire l'effondrement de la fonction d'onde. Pour une particule individuelle, l'effondrement de la fonction d'onde serait un événement très rare, qui se manifesterait en ➤

Les deux diamants en chute libre
sont dans des superpositions
d'états



Les diamants sont intriqués



UNE SECONDE EXPÉRIENCE : EN CHUTE LIBRE

Deux équipes (d'une part, Sougato Bose et ses collègues, d'autre part, Chiara Marletto et Vlatko Vedral) proposent d'essayer d'intriquer des électrons dans deux diamants en chute libre distants de 100 micromètres. Les particules n'interagiraient que par le champ gravitationnel des deux diamants. Une corrélation dans les propriétés des électrons confirmerait l'établissement de l'intrication et la nature quantique de la gravitation.



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.

- moyenne une fois tous les milliards d'années. Mais sur un objet macroscopique contenant de l'ordre de 10^{23} particules, on aurait souvent des effondrements, de sorte qu'un état non superposé se dessinerait.

La quatrième possibilité, enfin, est la plus chère à l'un d'entre nous (Carlo Rovelli), qui l'a proposée en 1994. L'idée est de prendre la physique quantique comme elle est, c'est-à-dire sans y ajouter de variables cachées et sans faire appel à des mondes multiples ou à une dynamique non observée. Les aspects apparemment paradoxaux de la théorie seraient engendrés par le fait qu'on oublie de tenir compte du caractère relatif de toutes les grandeurs physiques qui décrivent un système. Elles sont toujours définies relativement à un autre système physique (de la même façon que la vitesse d'un objet est définie seulement par rapport à un autre objet). Cette interprétation de la physique quantique, nommée «interprétation relationnelle», s'inspire de la relativité restreinte. Ainsi, si pour un observateur, un système est dans un seul état suite à l'effondrement de la fonction d'onde, il pourrait être encore dans une superposition d'états pour un autre observateur. Les états ne décrivent pas le système observé lui-même, mais une relation entre le système et l'observateur.

Ces quatre pistes pour mieux comprendre la physique quantique ont néanmoins toutes un coût conceptuel élevé : chacune exige de renoncer à quelque chose qui n'est pas facile à abandonner. La théorie de Broglie-Bohm se heurte à certaines difficultés quand on veut l'associer à la théorie de la relativité restreinte et demande d'accepter qu'une partie de la réalité soit en principe inobservable. L'interprétation des

mondes multiples demande d'imaginer qu'il y aurait une infinité inaccessible de couches de réalité, sans compter qu'il n'est pas aisé de relier ces mondes multiples à notre expérience. Les théories de réduction dynamique impliquent un phénomène d'effondrement spontané de la fonction d'onde que l'on n'a pas observé dans les expériences. L'interprétation relationnelle nous empêche de décrire le monde physique dans sa globalité : on peut seulement décrire une partie du monde par rapport à une autre.

L'ÉPREUVE DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Les discussions entre les théoriciens qui défendent l'une ou l'autre de ces pistes (ou d'autres encore) sont souvent très animées. Cela dit, comme le conseillait le physicien américain Richard Feynman : «Les lois plus générales de la physique admettent souvent des formulations et des interprétations très différentes ; mais un bon théoricien doit savoir les utiliser toutes, car nul ne sait laquelle se révélera la plus efficace.» Cette attitude est peut-être la plus recommandable vis-à-vis des difficultés conceptuelles de la physique quantique. Seule la suite de l'histoire pourra nous dire quelle est en définitive l'interprétation qui se montrera la plus efficace et utile. D'autant qu'il est un domaine d'étude qui permettrait de mettre à l'épreuve les différentes interprétations de la physique quantique. C'est celui qui vise à construire une théorie quantique de la gravitation.

Au xx^e siècle, les chercheurs se sont rapidement aperçus que les deux grandes avancées de la physique, la physique quantique et la relativité générale, sont difficiles à concilier. Si, dans la plupart des cas, il est effectivement possible de ne considérer qu'une seule de ces théories, l'absence d'une théorie quantique de la gravitation nous empêche de comprendre certains phénomènes réels, comme ce qui se passe au cœur des trous noirs ou au début de l'Univers.

Les deux pistes les plus prometteuses pour élaborer une théorie de «gravité quantique» sont la théorie des cordes et celle de la gravitation quantique à boucles. Si la première suggère que les particules ne sont pas ponctuelles, mais de minuscules cordes vibrantes, la seconde postule que l'espace-temps lui-même est sujet à tous les phénomènes typiques de la physique quantique, avec la conséquence, en particulier, que l'espace ne serait pas continu, mais discrétisé : aires et volumes deviennent des grandeurs quantifiées, qui ne peuvent être arbitrairement petites.

Ces théories ont connu d'importants développements s'étendant parfois au-delà de la seule question de la gravité quantique, avec des retombées, par exemple, en mathématiques ou en physique de la matière condensée.

Il y a encore une dizaine d'années, les scientifiques pensaient que les phénomènes de gravitation quantique étaient hors de portée des expériences, de sorte qu'il était impossible d'obtenir le moindre indice empirique permettant d'en savoir plus sur la nature réelle de la gravité quantique. Or cette impression était en partie fautive, comme l'ont montré plusieurs expériences et observations récentes.

Au LHC (le Grand collisionneur de hadrons), au Cern, les physiciens accélèrent des protons à des vitesses proches de celle de la lumière pour les faire se percuter frontalement et ainsi produire des collisions à haute énergie d'où émergent des particules massives de très courte durée de vie. C'est ainsi qu'ils ont confirmé l'existence du boson de Higgs, en 2012, pièce jusque-là manquante du modèle standard de la physique des particules. Ce modèle, développé à partir des années 1960, décrit les particules fondamentales et leurs interactions, mais il ne tient pas compte de la gravitation et laisse ouvertes certaines questions théoriques.

CORDES ET SUPERSYMETRIE

Une grande partie de la communauté scientifique était convaincue, à partir d'arguments théoriques, qu'il était possible d'étendre de façon très simple et naturelle le modèle standard grâce à la supersymétrie (une symétrie hypothétique entre particules de spin entier et particules de spin demi-entier). Cette extension du modèle standard implique l'existence de nouvelles particules que l'on pensait être en mesure de produire et d'observer au LHC. En outre, la théorie des cordes repose sur la supersymétrie et une détection de la supersymétrie au LHC aurait été une indication intéressante en faveur de cette théorie. Or une telle détection n'a pas eu lieu. Mais déjà, les scénarios supersymétriques les plus naturels ont été exclus. Dès lors, l'absence de supersymétrie au LHC n'est pas une bonne nouvelle expérimentale pour la théorie des cordes.

La théorie des cordes et la gravitation quantique à boucles ne sont pas les seules pistes pour une gravité quantique. D'autres ont été explorées et ont parfois été mises en grande difficulté par l'expérience. Par exemple, en 2009, Petr Hořava, de l'université de Californie à Berkeley, a proposé un modèle de gravité quantique qui brise l'invariance de Lorentz, la symétrie mathématique par laquelle se traduit l'absence de référentiel privilégié en relativité restreinte.

Motivés par ces spéculations, les astronomes ont cherché les signes d'une brisure de l'invariance de Lorentz dans l'Univers, par

exemple dans la mesure de la vitesse de rayons cosmiques. Les résultats ont été nets : non seulement on n'a trouvé aucune indication d'une brisure de cette invariance, mais celle-ci a été confirmée jusqu'à des échelles d'énergie supérieures à celles qui sont caractéristiques de la gravitation quantique. La gravité de Hořava et toute la classe de modèles prédisant une brisure de l'invariance de Lorentz sont ainsi mises en difficulté.

Depuis 2015, une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers s'est ouverte. La détection par les collaborations *Ligo* et *Virgo* d'ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, ont été une confirmation éclatante de la relativité générale. Mais elle a fait davantage. En 2017, une détection simultanée des ondes gravitationnelles et électromagnétiques produites par la coalescence de deux étoiles à neutrons a montré que ces deux types d'ondes se propagent à la même vitesse (avec une très petite marge d'erreur). Ce résultat a mis en difficulté de nombreuses théories de gravité modifiée, concurrentes de la relativité générale.

Celles-ci avaient été proposées pour expliquer certaines observations comme l'expansion accélérée de l'Univers ou la matière noire, mais elles prévoient souvent que la vitesse des deux types d'ondes doit être différente. Encore une fois, la nature nous indique que certaines directions de recherche n'étaient pas les bonnes. Ce qui n'empêche pas que, pour le savoir, il fallait tout de même les explorer.

UNE VISION QUI SE PRÉCISE

Enfin, un résultat empirique important pour la gravité quantique vient de la cosmologie : la 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.

Ces différents exemples de résultats observationnels et expérimentaux nous ont fait progresser sur ce que peut être la gravité quantique. ➤

L'INTRICATION EST UNE CONNEXION ÉTRANGE, SANS ÉQUIVALENT DANS LE MONDE ORDINAIRE

➤ 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.

REBONDIR EN TROU BLANC

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 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. 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 dans le prolongement 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. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. LALOË, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*, EDP Sciences/CNRS (2^e 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.

**ABONNEZ-VOUS À
POUR LA
SCIENCE**

SCIENCE

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à pouirlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	79€ Au lieu de 114,40 €	99€ Au lieu de 174,40 €

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

PAG20STDOS



OUI, je m'abonne
pour 1 an à **POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

**FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

79€
Au lieu de ~~114,40€~~

**FORMULE
INTÉGRALE**

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus

99€
Au lieu de ~~174,40€~~

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal Ville:

Téléphone

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

Nº

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

Date d'expiration Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://lebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.