

LES GRANDES VOIX DE LA RECHERCHE

Les médaillés d'or du CNRS explorent tous les domaines de la connaissance et présentent de manière claire et synthétique les grands défis de la science



6 juin



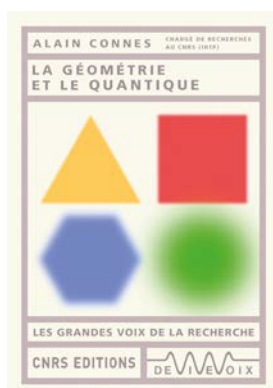
6 juin



6 juin



29 août



29 août



29 août



19 septembre



19 septembre

CNRS EDITIONS



96 pages - 8,00 €

Retrouvez-nous sur



et sur www.cnrseditions.fr

Numéro
500

La physique quantique a aujourd'hui presque 100 ans. Cette théorie jamais mise en défaut a révolutionné les sciences de la matière. Elle a donné lieu à de nombreuses applications, dont certaines, comme le transistor, sont au fondement de la révolution informatique. En a-t-on épuisé les ressources ? Pas du tout. On assiste même à un grand renouveau. Sur le plan fondamental, d'abord, l'interprétation de cette théorie, un défi déjà ancien, se pose aujourd'hui en des termes nouveaux, liés qui plus est à la question de la gravitation. Et sur le plan des applications, toute une ingénierie quantique se développe, qui fera peut-être passer l'ordinateur quantique du rêve à la réalité.

La théorie quantique de demain

L'ESSENTIEL

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

> Grâce aux travaux de John Bell et aux expériences d'Alain Aspect, il a été prouvé que cette théorie est non locale. 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
directeur
du laboratoire Larsim
du CEA à Saclay,
au sud de Paris



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

Les nouveaux défis de la physique quantique



Née il y a près de 100 ans, la physique quantique n'a jamais été mise en défaut et est au cœur des technologies modernes. Mais les difficultés de son interprétation persistent. Elles ont même suscité de nouvelles réflexions, parfois liées à un autre problème majeur et tout aussi persistant : l'élaboration d'une théorie quantique de la gravitation.



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.

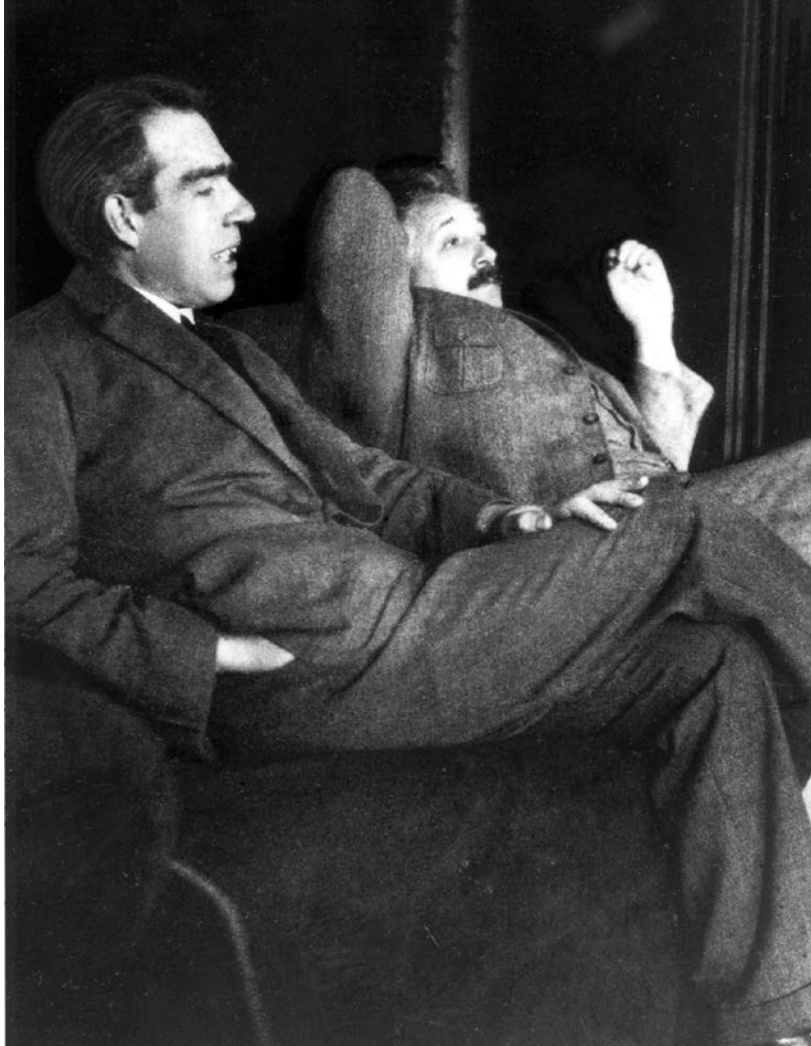
Au cours des années 1920, pour expliquer le comportement assez étrange des atomes et des particules, les physiciens ont développé des concepts radicalement neufs qui les ont conduits à penser autrement la matière et ses interactions. Une décennie d'effervescence créatrice et d'intense labeur a suffi 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 l'électronique de nos ordinateurs, dans nos téléphones portables, dans nos écrans ; elle est aussi à la source des lasers qui envoient de l'information aux quatre coins du monde.

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).

QUAND EINSTEIN ET BOHR S'OPPOSENT

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 « rentrer dans le rang » ?



Niels Bohr (à gauche) 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.

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 ci-dessus). 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 fausse, 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 – une « superposition » d'états possibles qui est 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 (voir l'encadré page 30).

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

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 son 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

Mises ensemble, ces trois hypothèses précisent ce qu'il faut entendre par le concept d'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 ➤

Pour Einstein, le monde réel existe objectivement, que nous l'observions ou non

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.

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

FONCTION D'ONDE, SUPERPOSITION D'ÉTATS, DÉCOHÉRENCE

En physique quantique, une particule est décrite par une fonction d'onde, souvent notée $|\Psi\rangle$. Cet objet mathématique permet de calculer les propriétés de la particule telles que son énergie. Si, par exemple, la particule peut avoir deux énergies possibles E_1 et E_2 , ces dernières sont associées à deux états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$ et, de façon générale, la fonction d'onde de la particule s'écrit comme une superposition de ces deux états : $|\Psi\rangle = a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ où a_1 et a_2 sont les « amplitudes de probabilité » associées aux deux états. Lors d'une mesure de l'énergie de la particule, l'instrument affichera une seule valeur, E_1 ou E_2 . La physique quantique ne prédit pas le résultat de la mesure, mais seulement les probabilités des résultats possibles. Ainsi, d'après l'un des axiomes de la théorie quantique, les énergies E_1 et E_2 sont obtenues avec des probabilités égales à $|a_1|^2$ et $|a_2|^2$ respectivement (la somme des probabilités $|a_1|^2 + |a_2|^2$ étant égale à 1).

Mélange statistique ou superposition d'états ?
Un problème expérimental se pose quand on étudie un ensemble de particules. Il est possible de préparer

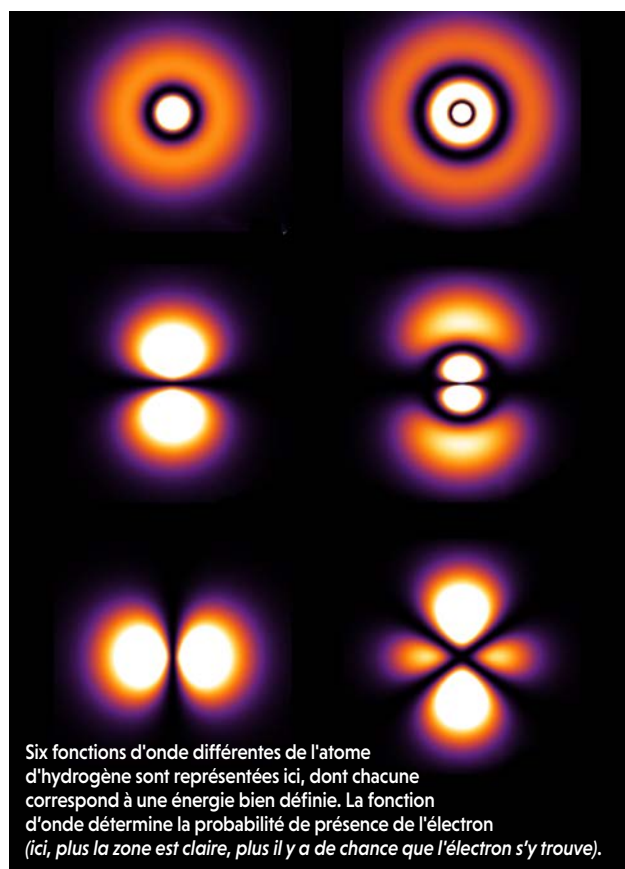
le mélange avec une proportion p_1 des particules dans l'état $|e_1\rangle$ et p_2 dans l'état $|e_2\rangle$; on parle dans ce cas de mélange statistique des états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$. Or un tel mélange est très différent d'une superposition d'états $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$, même si la simple mesure des énergies donne les mêmes résultats quand $p_1 = |a_1|^2$ et $p_2 = |a_2|^2$. On peut distinguer les deux situations à l'aide d'opérations appropriées qui mélangent les états $|e_1\rangle$ et $|e_2\rangle$, par exemple en appliquant un champ électrique au système, et en mesurant ensuite l'énergie. Les probabilités des résultats avec un mélange statistique seront alors différentes de celles avec une superposition d'états.

Effondrement de la fonction d'onde

Lors d'une mesure de l'énergie, une seule valeur est obtenue parmi les cas possibles, par exemple E_1 . Juste après la mesure, la fonction d'onde se réduit instantanément à $|\Psi\rangle = |e_1\rangle$. On parle alors d'effondrement de la fonction d'onde, qui passe brutalement de l'état $a_1|e_1\rangle + a_2|e_2\rangle$ (par exemple) à l'état $|e_1\rangle$. Ce phénomène discontinu et instantané est difficile à comprendre.

Décohérence macroscopique

Autre problème avec les superpositions d'états : on ne les observe pas dans le monde macroscopique. Erwin Schrödinger a illustré cette difficulté avec sa fameuse expérience du chat dans une boîte, où un mécanisme reposant sur un processus microscopique aléatoire tue



Six fonctions d'onde différentes de l'atome d'hydrogène sont représentées ici, dont chacune correspond à une énergie bien définie. La fonction d'onde détermine la probabilité de présence de l'électron (ici, plus la zone est claire, plus il y a de chance que l'électron s'y trouve).

le chat s'il est déclenché. Tant qu'on n'a pas ouvert la boîte pour voir l'état du chat, le mécanisme serait dans une superposition d'états « déclenché » et « non déclenché ». Cette superposition impliquerait que le chat serait dans une superposition des états « mort » et « vivant », situation qui paraît impossible, en tout cas inobservée. En 1970, le théoricien allemand Dieter Zeh a proposé d'expliquer

l'absence de superpositions d'états pour des systèmes macroscopiques par un processus de « décohérence quantique » dû aux interactions du système avec son environnement. Ces interactions détruiraient une superposition d'états d'autant plus vite que le système est grand. En 1996, des expériences de l'équipe de Serge Haroche, à Paris, ont confirmé pour la première fois ce scénario de passage du quantique au classique.

> leurs vitesse et position dans des rapports pré-établis. 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 plus tard 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 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 l'envoi de 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.

Pour Einstein, Podolsky et Rosen, la théorie quantique souffrait d'incomplétude

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.

Le cas des cartes de Paul et Julie est évidemment un problème de nature classique, où la part probabiliste (la carte de Julie est-elle rouge

ou bleue?) 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.

DÉBAT EINSTEIN-BOHR: UNE ISSUE GRÂCE À JOHN BELL

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, un physicien nord-irlandais du nom de John Bell, très soucieux, lui, de clarté conceptuelle, vint modifier radicalement la situation et transforma le débat, initialement philosophique, en un problème de physique.

Bell était au départ un physicien «réaliste» comme Einstein, c'est-à-dire qu'il partageait *a priori* son point de vue selon lequel les événements surviennent indépendamment du contexte expérimental de leur manifestation. Mais il avait remarqué quelque chose de curieux: toutes les théories qui avaient été bâties jusqu'alors dans le but de compléter le formalisme de la physique quantique par l'introduction de paramètres supplémentaires ne parvenaient à satisfaire aux hypothèses de validité de la physique quantique et de réalité qu'en violant l'hypothèse >

> de localité! Autrement dit, ces théories étaient toutes non locales.

S'agissait-il d'une imperfection de ces théories particulières? Ou bien était-ce une propriété générale de toutes les théories à paramètres supplémentaires susceptibles d'être construites? C'est ce que Bell voulut savoir. À sa grande surprise, il parvint à démontrer que, dans tous les cas, quelle que soit la façon de s'y prendre, aucune théorie prétendant décrire la réalité ne pourra respecter le critère de localité.

Bell alla plus loin en proposant 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 ce qu'on nomme des «variables cachées locales». La controverse entre Bohr et Einstein allait pouvoir être tranchée au laboratoire!

De fait, au début des années 1980, une équipe de chercheurs 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 (*voir l'image page 36*), 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.

LA THÉORIE QUANTIQUE EST NON LOCALE

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 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.

PLUSIEURS INTERPRÉTATIONS

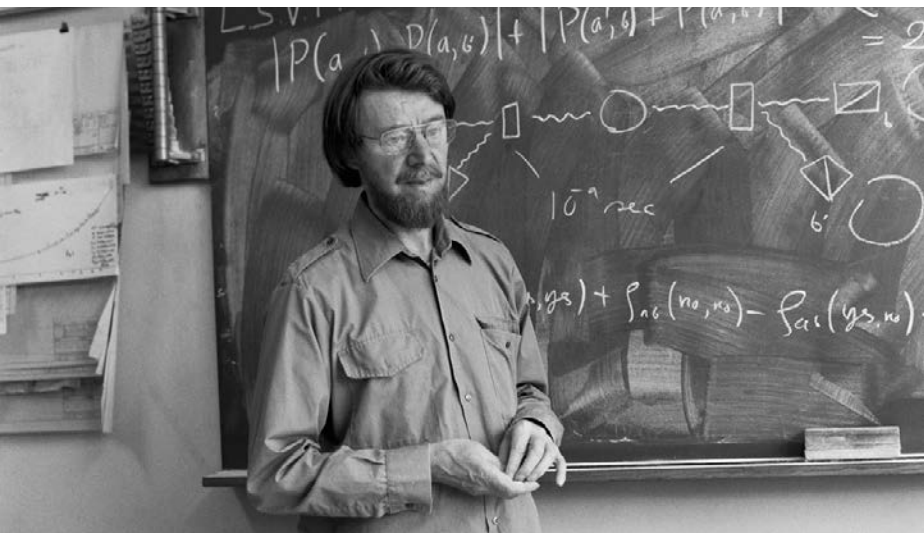
Évoquons ici les quatre directions principales explorées pour résoudre les difficultés conceptuelles de la physique quantique. Une première approche reprend le principe des variables cachées, c'est-à-dire l'idée que la physique quantique est incomplète et qu'il existe des variables structurellement impossibles 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.

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



L'intrication est une connexion étrange, sans équivalent dans le monde ordinaire





Le physicien John Bell a formulé les inégalités qui portent son nom, en 1964. Des expériences, notamment celles d'Alain Aspect et ses collègues au début des années 1980, ont montré que ces inégalités sont violées. Ce résultat implique que la théorie quantique est non locale.

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 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.

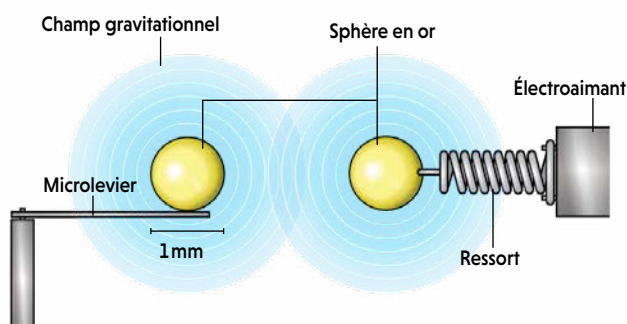
Ces quatre pistes pour mieux comprendre la physique quantique ont néanmoins toutes un coût conceptuel élevé : chacune exige de renoncer à quelque chose qui n'est pas facile à abandonner. La théorie de Broglie-Bohm se heurte à certaines difficultés quand on veut l'associer à la théorie de la relativité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

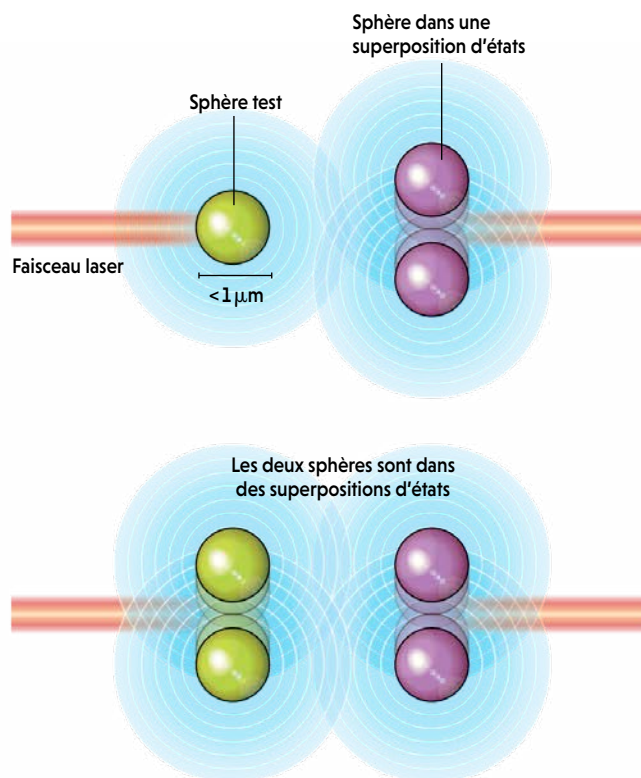
DES EXPÉRIENCES DE GRAVITÉ QUANTIQUE

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 ASPELMAYER

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 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.

> interprétations de la physique quantique. C'est celui qui vise à construire une théorie quantique de la gravitation.

DEUX THÉORIES INCONCILIABLES ?

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.

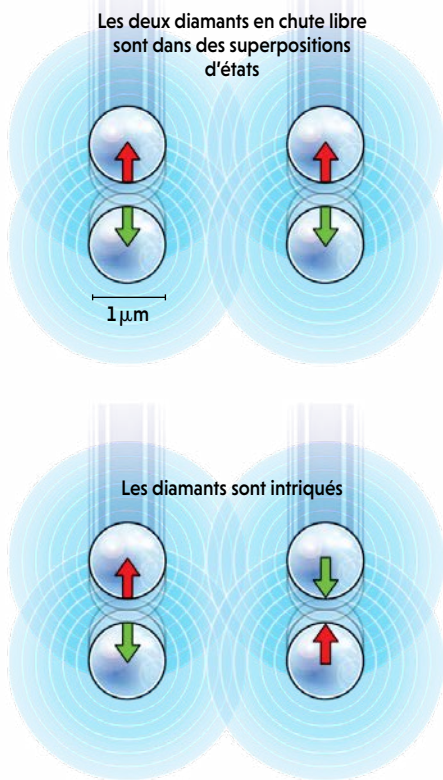
Les deux pistes les plus prometteuses pour élaborer une théorie de «gravité quantique» sont la théorie des cordes et celle de la gravitation quantique à boucles. Si la première suggère que les particules ne sont pas ponctuelles mais de minuscules cordes vibrantes, la seconde postule

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



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.

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.

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.

BEAUCOUP DE MODÈLES ONT ÉTÉ ÉLIMINÉS

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.

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.

UNE VISION QUI SE PRÉCISE

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

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

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

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



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

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

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

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

La gravitation quantique héritera des problèmes conceptuels de la physique quantique

BIBLIOGRAPHIE

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

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

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

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'EXPÉRIENCES

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

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

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

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

Direction des relations avec les entreprises

cnrs

formation entreprises

Organisme de formation continue



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

pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens



Domaines de formation

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

+ de **1600 stagiaires** en 2018



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



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

@CNRS_CFE

PASCALE SENELLART-MARDON

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



L'ordinateur quantique devient un enjeu politique

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