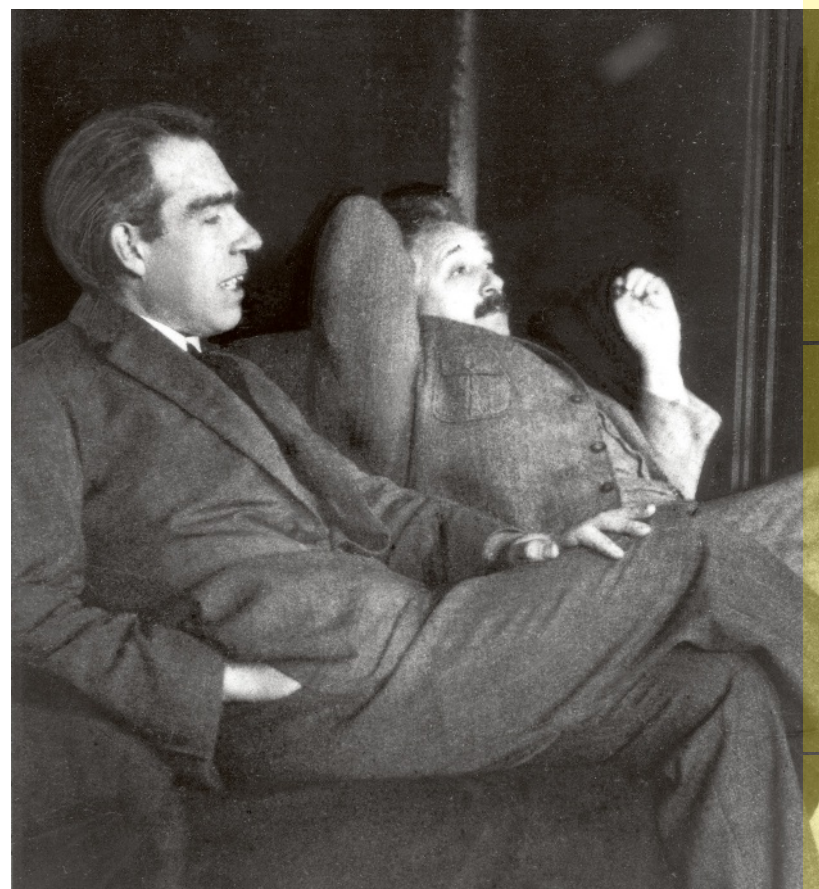


éléments de réalité (ici la position et la vitesse). Il faut donc considérer la théorie comme incomplète: des variables qui n'apparaissent pas dans son formalisme mathématique porteraient ces informations, ces éléments de réalité. Ou alors, il faudrait imaginer que la position et la vitesse ne sont pas 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!

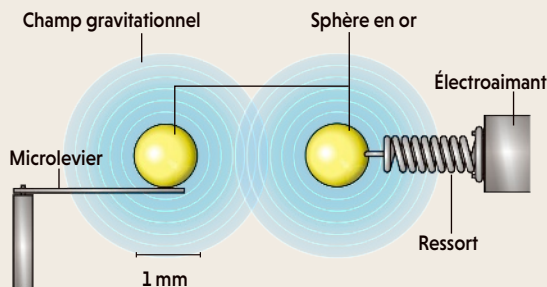
Ce fut le cas au début des années 1980, quand une équipe de l'institut d'optique d'Orsay, dirigée par Alain Aspect, mena à bien une série d'expériences avec des photons intriqués, qui montra qu'en l'occurrence, ce sont les prédictions de la physique quantique telle qu'elle

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

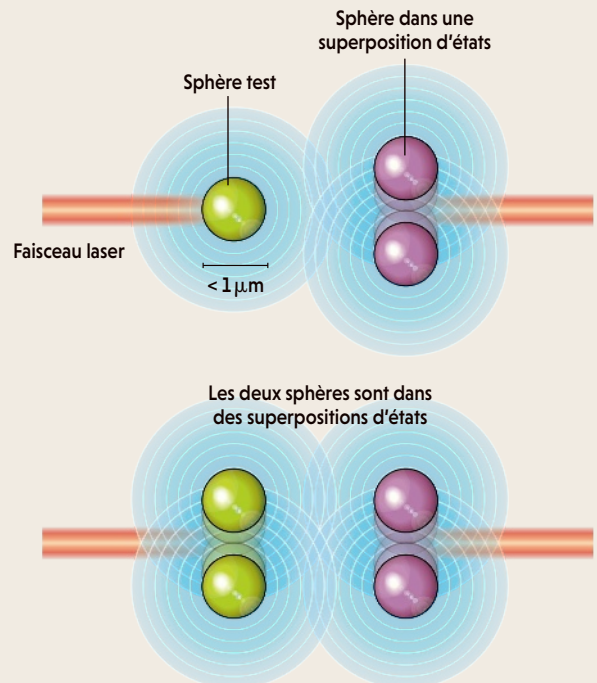
DES EXPÉRIENCES DE GRAVITÉ QUANTIQUE

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 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-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.