

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

