

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 dépendre des 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

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

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 ➤