

➤ quantique. Les grandes choses – c'est-à-dire à partir de la taille d'un virus – se manifestent toujours en un seul endroit. Tout le mystère est là: tout objet étant constitué de matière et d'énergie qui obéissent aux lois quantiques, pourquoi n'expérimentons-nous pas l'étrangeté quantique? En d'autres termes, où le monde quantique s'arrête-t-il et où commence le monde classique? Y a-t-il un fossé entre les deux, un seuil à partir duquel les effets quantiques cessent de se manifester? Ou bien sommes-nous aveugles à une mécanique quantique qui régnerait à toutes les échelles?

De fait, «nous ignorons la véritable nature de la matière entre les mondes micro et macro», avoue Angelo Bassi, chercheur en physique théorique à l'université de Trieste, en Italie. Ce *no man's land* laisse les physiciens perplexes depuis la naissance de la théorie quantique il y a un siècle. Mais ces dernières années, Simon Gröblacher et d'autres ont mis sur pied des expériences extrêmement sensibles qui pourraient révéler les secrets de la transition du quantique vers le quotidien. Nul ne sait si ces efforts porteront leurs fruits, mais une chose est sûre: en sondant les contours flous du monde quantique, les chercheurs pourraient bien mettre au jour un tout nouveau domaine de la physique.

UN PROBLÈME DE MESURE

Ces paradoxes d'échelles n'empêchent pas la mécanique quantique d'être la théorie scientifique la plus puissante et exigeante jamais élaborée. Ses prédictions coïncident avec les expériences avec une précision ridicule élevée. En révolutionnant notre compréhension de la structure atomique, elle a transformé toutes les facettes de la science, de la biologie à l'astrophysique. Sans la théorie quantique, notre monde ne ressemblerait pas à ce qu'il est, pas de GPS, pas de smartphone, pas de laser... Pourtant, la théorie présente un défaut flagrant, selon Stephen Adler, de l'institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey. «En mécanique quantique, rien ne se passe.» C'est-à-dire?

Le physicien se réfère à l'équation fondamentale de la théorie quantique quant à la nature de la réalité. Connues sous le nom de fonction d'onde, ces équations attribuent des probabilités à ce qu'un objet soit découvert dans tel ou tel état. Contrairement à la physique classique, ou newtonienne, selon laquelle les pommes, les planètes et tout le reste ont toujours des propriétés bien définies, la physique quantique est intrinsèquement probabiliste. Dans un sens, on ne peut pas dire que les particules décrites par des fonctions d'onde existent vraiment; elles n'ont pas

d'emplacement, de vitesse ni d'énergie déterminée, seulement des probabilités.

Tout change lors d'une mesure. À ce moment, des propriétés tangibles font surface, comme si elles étaient invoquées par la simple tentative de les observer. La théorie n'explique pas cette transformation, ni d'ailleurs pourquoi une possibilité se manifeste plutôt qu'une des nombreuses autres. La mécanique quantique décrit ce qui pourrait arriver lorsque l'on effectue une mesure, mais pas ce qui va arriver. Autrement dit, la théorie ne fournit pas de mécanisme expliquant la transition du probable vers l'avéré.

Pour que «les choses se produisent» en mécanique quantique, l'un des fondateurs de la théorie estime nécessaire une faille métaphysique. À la fin des années 1920, Werner Heisenberg a formulé puis diffusé l'idée selon laquelle le fait de mesurer «réduit le paquet d'onde» d'une particule: les nombreuses issues potentielles sont instantanément réduites à une seule, le résultat observé.

Le seul défaut de cette idée est que rien ne dit, dans les équations de la théorie quantique, qu'une réduction se produit. Aucun processus physique connu ne l'explique. La solution de Heisenberg introduit en fait un nouveau mystère: que se passe-t-il exactement lors de la réduction du paquet d'onde? De nos jours, cette énigme quantique est connue sous le nom de «problème de la mesure.»

Les physiciens se sont accoutumés à l'idée de réduction ces quatre-vingt-dix dernières années, mais ils ne l'ont jamais vraiment admise. L'idée qu'une action humaine – la mesure – joue un rôle central dans l'une des théories les plus fondamentales sur le fonctionnement de

l'Univers ne satisfait guère quiconque est partisan du concept de réalité objective.

LE CHOIX DE L'INTERPRÉTATION

«Fondamentalement, j'ai un idéal de ce que devrait être une théorie physique, concède Steven Weinberg, Prix Nobel de physique, à l'université du Texas à Austin. Ce devrait être quelque chose qui ne se réfère en aucune manière aux êtres humains. Ce devrait être une base à partir de laquelle tout le reste – y compris tout ce que vous pourriez dire systématiquement sur la chimie, la biologie ou les affaires humaines – peut être dérivé. Les lois de la nature ne devraient pas commencer par un facteur humain. Et pourtant, je ne vois pas comment formuler la mécanique quantique sans un postulat interprétatif faisant référence à ce qu'il se passe lorsque des personnes choisissent de mesurer telle ou telle chose.» ➤

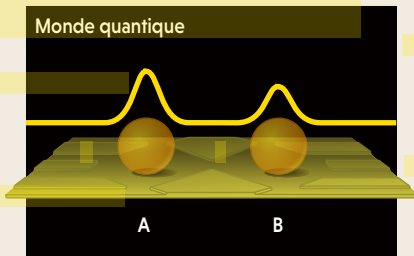
SOMMES-NOUS AVEUGLES À UNE MÉCANIQUE QUANTIQUE QUI RÉGNERAIT À TOUTES LES ÉCHELLES?

DES MONDES SÉPARÉS

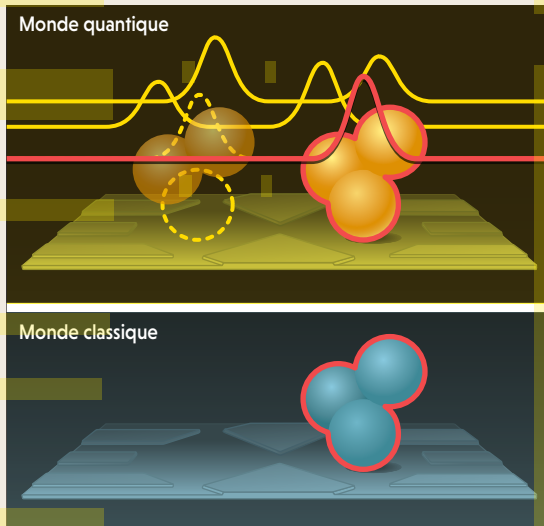
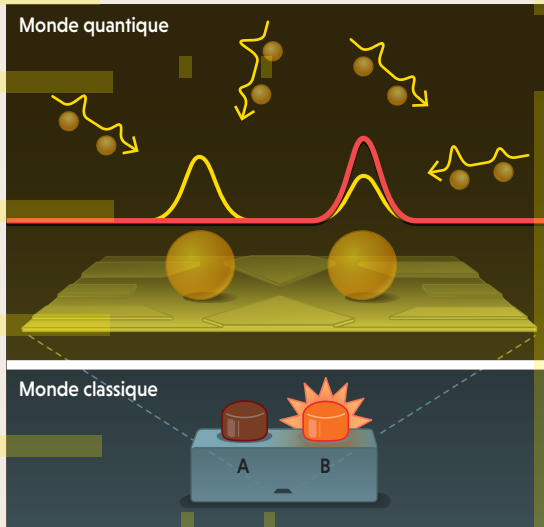
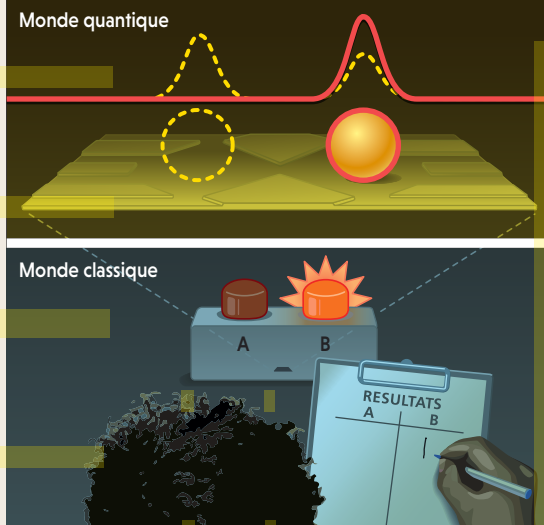
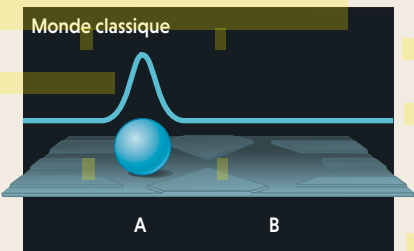
La mécanique quantique est synonyme d'effets étranges dans le monde microscopique. Mais nous ne les observons pas dans la réalité «classique» macroscopique. Pourquoi? Les scientifiques n'ont jamais compris pourquoi ni comment l'Univers saute d'un monde à l'autre, mais plusieurs théories, comme celles montrées ici, offrent d'éventuelles explications.

Quantique contre classique

D'après la mécanique quantique, les particules n'existent pas dans un état défini – à tel ou tel endroit, ayant telle ou telle énergie – mais se trouvent en fait simultanément dans chacun de ces états et positions. La théorie décrit les particules avec des fonctions d'onde, des équations qui sont des combinaisons, ou des «superpositions», de plusieurs ondes. Par exemple, pour la position, l'amplitude de chaque pic dans une fonction d'onde indique la probabilité pour une particule d'être observée en un endroit donné, ici au point A ou B.



Quand les scientifiques effectuent des mesures sur une particule, toutes les possibilités quantiques semblent se réduire à une seule, vraisemblablement déterminée aléatoirement. L'expérience révélera que la particule se trouve au point A, par exemple, ce qui la fait entrer dans le monde classique, puisqu'elle cesse d'exister dans un état de superposition.



Effondrement et mesure

L'une des théories qui visent à expliquer comment l'Univers passe du monde quantique au monde classique prétend que l'action de mesurer joue un rôle. Les particules peuvent s'attarder dans un état de superposition quantique (le pointillé jaune) tant que personne ne les observe. Mais dès que l'on effectue une mesure, la particule est «obligée de choisir» un état spécifique (lignes rouges). Comment cela se passe-t-il, et pourquoi les mesures peuvent-elles avoir tant d'importance en physique? Cela reste un mystère.

Décohérence

Une autre théorie estime que l'environnement d'une particule est responsable de cette transition du monde quantique vers le monde classique. Tant qu'une particule n'est pas perturbée par une influence extérieure, pense-t-on, elle peut rester en état de superposition. Mais dès lors que les fonctions d'onde d'autres particules ou objets voisins rencontrent la sienne, elles interfèrent, ce qui entraîne la réduction des nombreuses possibilités quantiques de la particule à une seule réalité classique.

Localisation spontanée continue

Une autre possibilité serait que la réduction de la fonction d'onde en une possibilité singulière soit un événement aléatoire, qui ne serait pas causé par la mesure ni par l'interférence de l'environnement. Les probabilités que n'importe quelle particule se réduise à n'importe quel moment sont extrêmement faibles, mais dans les objets macroscopiques qui contiennent une multitude d'atomes, la réduction d'au moins l'une de ces particules est inévitable, ce qui engendre la réduction de la structure entière.

N'IMPORTE QUELLE MESURE PARTICULIÈRE NE CAPTURE QU'UN FRAGMENT DU MONDE QUANTIQUE

> Un tour de passe-passe permet de s'extirper du problème de la mesure : il consiste à présumer que le phénomène de réduction n'a pas lieu. Au début des années 1970, Heinz-Dieter Zeh, aujourd'hui professeur émérite à l'université de Heidelberg, en Allemagne, a proposé un processus qui donne l'apparence de la réduction tout en préservant la multiplicité quantique de la fonction d'onde.

Il fait valoir que, dans le monde réel, la fonction d'onde de n'importe quelle particule observée s'enchevêtre avec celle de tout ce qui se trouve dans son environnement, rendant impossible le suivi des innombrables interactions quantiques qui se produisent autour de nous. En termes quantiques, les fonctions d'onde deviennent intriquées (*voir Pas d'échappatoire pour l'intrication, par R. Hanson, page 26*). Un observateur ne peut qu'espérer voir une petite fraction de ce vaste système enchevêtré. En conséquence une mesure particulière ne capture qu'un fragment du monde quantique.

Ce processus, que Heinz-Dieter Zeh nomme la décohérence, a vite été adopté par les physiciens pour expliquer pourquoi nous ne percevons pas de phénomènes quantiques au niveau macroscopique. Il décrit l'effondrement d'une fonction d'onde intacte

(qui comprend tous les états physiques possibles qu'une particule peut avoir) lorsqu'elle interagit avec celles d'autres systèmes quantiques voisins. Si ce modèle est juste, nous vivons au milieu de cette toile quantique intriquée dont nous ne voyons qu'une partie.

La décohérence ne résout pas le problème de la mesure pour tous les physiciens. Par exemple, elle n'explique pas pourquoi nous voyons un fil de la toile quantique et pas les autres. «Il faut encore invoquer la réduction, selon laquelle un des états intriqués doit être sélectionné», explique Miles Blencowe, du Dartmouth College, aux États-Unis.

Pour lui et d'autres, ce processus ne capture pas notre expérience des choses, notamment son aspect temporel. «Comment, ajoute-t-il, passe-t-on d'un état intriqué à une perception du monde qui évolue avec le temps selon un unique chemin?» De nombreux spécialistes estiment qu'il faut passer par une réduction pour rétablir cette unité du monde à mesure qu'il évolue plutôt que cette toile

intriquée qui ne cesse de s'élargir. Stephen Adler se montre un peu plus direct à propos de la décohérence : «Elle ne fournit aucun mécanisme [pour la réduction]. Elle ne résout pas le problème, point final.»

Il y a soixante ans, un étudiant de l'université de Princeton proposa une solution encore plus radicale au problème de la réduction. Dans sa thèse de 1957, Hugh Everett expliquait que la fonction d'onde ne se réduit ni ne subit une décohérence. Au contraire, tous ses composants sont physiquement réels, et constituent des parties d'une panoplie d'univers aux ramifications infinies. Cette «théorie des univers multiples» est devenue populaire parmi les cosmologistes, qui ont d'autres raisons de penser que nous habitons un multivers. Mais personne n'est jamais parvenu à tester expérimentalement cette idée des mondes multiples et à la distinguer de la théorie quantique standard.

Il en va de même pour d'autres interprétations de la mécanique quantique. Le physicien français Louis de Broglie, l'un des fondateurs de la théorie quantique, cherchait à supprimer la nécessité de la réduction du paquet d'ondes en introduisant la notion «d'ondes pilotes» qui guident les trajectoires des électrons et de toutes les autres particules.

Dans cette version de la théorie quantique, que le physicien américain David Bohm a davantage développée dans les années 1950, il n'y a pas de réduction mystérieuse ; les mesures montrent simplement les interactions d'ondes pilotes et de leurs particules associées. Mais, encore une fois, personne n'a pu le prouver expérimentalement. La théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie et David Bohm, la théorie des mondes multiples d'Everett et les dizaines d'autres approches de la mécanique quantique sont au même stade.

Finalement, les physiciens choisissent leur description de la réalité préférée d'après un critère esthétique. «J'en reviens au fait que nous avons un seul monde qui évolue, insiste Miles Blencowe. Pour cela, on a vraiment besoin d'une sorte de réduction, qui serait plus qu'une simple règle pour les résultats expérimentaux, un processus bien réel.»

LA VILLE INTRIKUÉE

La ville de Delft pourrait être qualifiée de système quantique intriqué. Ses canaux placides et ses bâtiments médiévaux de briques se superposent dans l'espace et dans le temps avec des voitures, des cyclistes, des magasins de téléphones portables et des étudiants qui arpentent les mêmes rues étroites qu'a explorées le peintre Johannes Vermeer. Le laboratoire de Simon Gröblacher est à environ 2 kilomètres au sud du centre historique et... à des centaines d'années dans le futur !

Par un matin chaud de printemps, il montre à un visiteur l'une des «grandes, très