

laquelle nous sommes accoutumés. Qui plus est, ils observeraient un hasard apparent, obéissant à des lois de probabilité classiques.

Le point de vue d'Everett – de son vrai nom, la formulation des états relatifs – est plus connu sous le nom d'interprétation des univers parallèles de la mécanique quantique, car chacune des composantes d'un état mental superposé ne perçoit que le monde auquel elle appartient. Selon Everett, il n'y aurait jamais de réduction de la fonction d'ondes, mais, à chaque mesure, l'Univers se scinderait en autant d'univers parallèles qu'il est possible, chaque univers parallèle correspondant à une valeur particulière de la grandeur mesurée. Ce point de vue simplifie la théorie sous-jacente en évacuant le postulat de réduction du paquet d'ondes, mais il y a un prix à payer pour cette «simplification» : outre qu'elle paraît impossible à tester, il peut sembler difficile d'admettre que l'observateur lui-même se scinde en plusieurs observateurs différents, à chaque mesure qu'il effectue, et que les différentes perceptions de la réalité sont toutes aussi réelles les unes que les autres.

Ces travaux passèrent inaperçus pendant près de 20 ans. Trop de physiciens espéraient encore qu'une théorie plus pertinente serait découverte, qui rendrait au monde sa nature classique, et exclurait les bizarreries telles que des objets macroscopiques se trouvant à deux endroits à la fois. Une nouvelle série d'expérience brisa ces espoirs.

Pouvait-on remplacer l'apparent hasard quantique par une grandeur, certes inconnue, mais qui caractériserait les particules, une variable cachée ? John Bell, théoricien du CERN, montra que, si tel était le cas, le résultat de la mesure de certaines grandeurs serait différent de ce que prévoit la mécanique quantique. De nombreuses années s'écoulèrent avant que les physiciens ne disposent de la technique nécessaire pour faire les expériences correspondantes et n'excluent la possibilité des variables cachées.

En 1978, l'un d'entre nous (John Archibald Wheeler) proposa l'expérience du «choix retardé», qui fut réalisée avec succès en 1984 : elle mettait en évidence un nouvel aspect quantique du monde qui défie la conception classique. Dans cette expérience, un photon peut se trouver en deux endroits simultanément, mais on peut

aussi choisir, après coup, si ce photon était en un seul endroit ou aux deux à la fois. Une autre expérience, achevée en 1982, celle d'Alain Aspect et de ses collègues de l'Institut d'optique théorique et appliquée d'Orsay fut également décisive pour enterrer les théories à variables cachées. Dans cette expérience, un atome excité émet deux photons quand il se désexcite, et l'on mesure la polarisation de ces photons créés ensemble ; les résultats des mesures sont corrélés, et les corrélations observées sont plus fortes que celles prévues par les théoriciens dans l'hypothèse des variables cachées.

La décohérence, censure quantique

L'expérience de Stern et Gerlach, où des photons ou des électrons traversent deux fentes et produisent des interférences était tenue par le physicien américain Richard Feynmann pour «la mère de tous les effets quantiques» ; elle a été reproduite avec des objets volumineux, tels des atomes, de petites molécules et, plus récemment, des fullerènes (des molécules 60 atomes de carbone, arrangés en «ballon de football»). Le groupe d'Anton Zeilinger, à Vienne, a même envisagé de reconduire l'expérience avec un virus. Une réalité incontournable ressort de toutes ces expériences : l'étrangeté quantique est bien réelle, que cela nous convienne ou non.

Les avancées expérimentales des dernières décennies s'accompagnèrent de progrès théoriques. Les travaux d'Everett avaient laissé sans réponse deux questions essentielles : si le monde contient réellement d'étranges superpositions macroscopiques, pourquoi ne les percevons-nous pas ? Selon quel mécanisme l'un des deux états classiques (carte à l'endroit et carte à l'envers) devient-il observable ?

La réponse à la première question fut apportée en 1970, quand Dieter Zeh, de l'Université de Heidelberg, démontra que l'équation de Schrödinger elle-même engendre une forme de censure. Cet effet a pris le nom de décohérence, par opposition à la cohérence quantique que l'on attribue à un état de superposition quantique. La théorie de la décohérence a été élaborée, notamment par D. Zeh et par Wojciech Zurek, de Los Alamos. Ils ont montré que les superpositions cohérentes ne subsistent que tant qu'elles

restent ignorées du reste du monde. Ainsi, une carte quantique en chute libre subit en permanence des chocs exercés par les molécules d'air et les photons, autant de corpuscules qui «déterminent» en permanence comment la carte tombe, détruisant («décohérant») ainsi la superposition, de sorte que l'on ne peut plus observer celle-ci.

Tout se passe presque comme si l'environnement du système étudié se comportait comme un observateur qui, simplement parce qu'il regarde la carte, réduit la fonction d'onde. Supposez qu'une amie regarde de quel côté tombe la carte sans vous communiquer le résultat. Selon l'interprétation de Copenhague, son observation a réduit l'état de superposition à un état bien défini, et la meilleure description possible de la situation n'est plus celle d'un état quantique de superposition, mais la représentation classique de votre ignorance de ce que votre amie a vu. Plus simplement, les calculs de décohérence montrent qu'un observateur humain (et, par conséquent, une réduction de la fonction d'onde explicite) n'est pas indispensable : une unique molécule d'air, qui rebondit sur l'un des côtés de la carte, suffit. Cette minuscule interaction suffit à faire disparaître la cohérence de l'état superposé et à faire réapparaître une situation classique.

Le phénomène de décohérence explique pourquoi nous n'observons pas de superpositions quantiques dans le monde qui nous entoure. La mécanique quantique ne cesse pas de s'appliquer aux objets qui dépassent une certaine taille critique, mais les systèmes macroscopiques, tels un chat ou une carte, ne sont pas suffisamment isolés pour empêcher la décohérence. En revanche, les objets microscopiques sont plus faciles à isoler de leur environnement, et ils conservent mieux leur comportement quantique.

La décohérence a aussi apporté une réponse à la deuxième question d'Everett : quel mécanisme confère un statut particulier (celui d'état observable) aux deux états classiques (carte tombée vers la droite ou vers la gauche) ? Si nous considérons ces états d'un point de vue strictement quantique, qu'ont-ils de particulier par rapport aux états de superposition ? Pourquoi les univers multiples d'Everett se scindent-ils toujours d'une façon telle que seules les catégories «vers la gauche»

ou «vers la droite», que nous connaissons, apparaissent, mais jamais d'autres? La réponse découle de la théorie de la décohérence : les calculs montrent que ces états classiques sont précisément ceux qui «résistent» à la décohérence, c'est-à-dire que les interactions avec l'environnement laissent la carte sur l'une ou sur l'autre des deux faces, mais amènent un état de superposition vers l'un ou l'autre des états classiques (vers la gauche ou vers la droite).

Décohérence et cerveau

Les physiciens ont pour habitude de diviser l'Univers en deux parties : le système étudié et le reste. En thermodynamique, par exemple, on distingue le corps matériel et son environnement, qui impose les conditions de température et de pression. De même, en physique quantique, le système étudié est séparé du dispositif de mesure, considéré d'un point de vue classique. Cependant, si l'on admet l'évolution unitaire de l'Univers et la décohérence, on doit alors diviser l'Univers en trois parties, chacune d'elles étant décrite par un état quantique : le système étudié, son environnement et l'observateur.

La décohérence, qui résulte des interactions de l'objet étudié avec son environnement, nous empêche de percevoir les superpositions quantiques d'états mentaux. Nos cerveaux sont si intimement liés à leur environnement que, même si nos neurones pouvaient percevoir de telles superpositions, leur décohérence serait inévitable, quasi instantanée. D. Zeh a remarqué que cela justifie *a posteriori* le postulat de la réduction du paquet d'ondes des textes fondateurs de la mécanique quantique, c'est-à-dire que l'on peut faire tous les calculs de probabilité que l'on veut à partir du moment où l'on admet que la fonction d'onde est réduite dès que l'objet est observé. Même si, dans la théorie d'Everett, les fonctions d'ondes ne sont jamais réduites, les physiciens s'accordent à dire qu'en pratique l'effet de la décohérence ressemble étrangement à une réduction du paquet d'ondes.

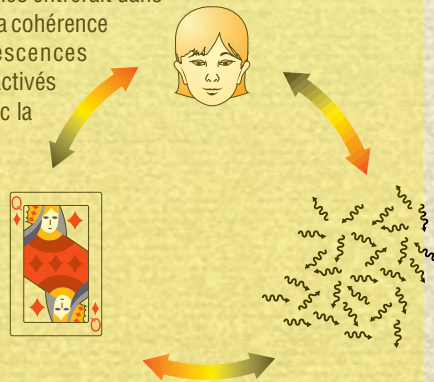
La découverte du phénomène de décohérence, ainsi que la multiplication des démonstrations expérimentales des étranges phénomènes quantiques ont fait considérablement

Scinder la réalité

On peut partager l'Univers en trois parties : l'objet étudié, son environnement et l'observateur dans son état quantique, que l'on nomme le sujet. L'équation de Schrödinger – qui s'applique à l'Univers dans son ensemble – peut être divisée en une somme de termes qui décrivent la dynamique interne de chacun de ces trois sous-systèmes, et de termes qui décrivent leurs interactions. Chacun de ces termes a un effet différent.

Le terme qui décrit la dynamique de l'objet étudié est en général le plus important ; aussi, quand il veut anticiper l'évolution d'un objet, les théoriciens commencent par ignorer les autres termes. Par exemple, on prévoit que la carte quantique sera dans un état de superposition, c'est-à-dire qu'elle tombera à la fois vers la droite et vers la gauche. Dès qu'une observatrice regarde la carte, l'interaction sujet-objet étend la superposition à son état mental, produisant la superposition d'un état de satisfaction parce qu'elle a gagné et d'un état de déception parce qu'elle a aussi perdu. Toutefois, elle ne perçoit jamais la superposition, car l'interaction entre l'objet et son environnement (les molécules d'air et les photons qui rebondissent à la surface de la carte) provoque une décohérence rapide qui fait disparaître la superposition.

Notons que, même si l'observatrice isolait complètement la carte de l'environnement (en faisant l'expérience dans un caisson sous vide, sombre et au zéro absolu), rien ne changerait. Sans doute qu'au moment même où elle regarderait la carte, l'un au moins de ses neurones entrerait dans un état de superposition et perdrait sa cohérence en 10^{-20} secondes. Si les arborescences complexes des neurones qui sont activés dans le cerveau ont quelque lien avec la façon dont s'élaborent nos pensées et nos perceptions – notre conscience –, alors le phénomène de décohérence empêche à coup sûr nos neurones de percevoir des états quantiques superposés. Nos cerveaux mêlent le sujet et l'environnement, et nous empêchent d'échapper à la décohérence.



évoluer la perception que les physiciens ont de la mécanique quantique. À l'origine, le postulat de la réduction du paquet d'ondes fut introduit pour expliquer pourquoi les expériences produisent des résultats déterminés et non d'étranges superpositions de résultats. Cette motivation initiale a pratiquement disparu. Qui plus est, personne n'a encore élaboré l'équation qui déterminerait exactement à quel moment cette mystérieuse réduction du paquet d'ondes est censée se produire.

Un petit sondage réalisé en juillet 1999 auprès des participants à un congrès sur l'informatique quantique, à Cambridge, a révélé que l'attitude des physiciens vis-à-vis de la réduction du paquet d'ondes est en train de changer. Parmi les 90 physiciens interrogés, seuls huit déclaraient croire à une réduction explicite des fonctions d'ondes. Une trentaine optè-

rent pour l'interprétation des «univers parallèles» ou pour sa variante des «histoires cohérentes», qui ne font pas appel à la réduction du paquet d'ondes (avec les «histoires cohérentes», on analyse des séquences de mesure et l'on assemble les résultats partiels pour former des «histoires» logiquement cohérentes pour un observateur).

Toutefois, plus de la moitié des physiciens interrogés ont choisi «aucune des réponses» ou «ne sait pas». Une difficulté linguistique explique sans doute en partie ce chiffre élevé. Il est fréquent que deux physiciens adhèrent à l'interprétation de Copenhague sans y accorder le même sens.

Cela dit, le sondage indique clairement qu'il serait temps de réviser les livres de physique quantique. Même si ces ouvrages précisent inmanquablement que le principe de réduction du paquet d'ondes est un