

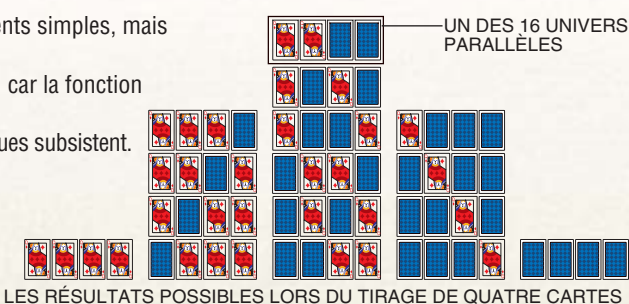
L'interprétation des univers parallèles

IDÉE : Les superpositions apparaissent comme des événements simples, mais aux yeux d'habitants d'univers parallèles.

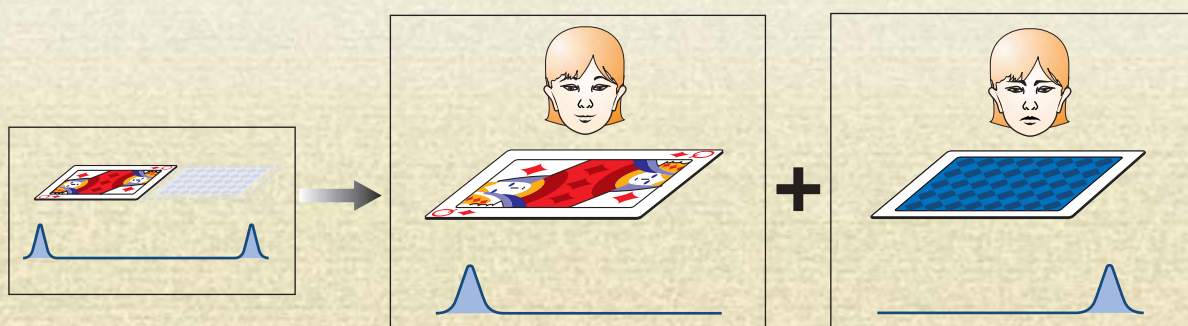
AVANTAGES : L'équation de Schrödinger s'applique toujours, car la fonction d'onde n'est jamais réduite.

PROBLÈMES : L'idée est étrange, et certaines difficultés techniques subsistent.

En l'absence d'une réduction du paquet d'ondes, l'équation de Schrödinger prévoit que la personne qui regarde une carte à jouer dans un état superposé entre elle-même dans une superposition de deux états mentaux : un état heureux où elle a gagné son pari et un état malheureux où elle a perdu. Ces deux composantes de la fonction d'onde totale (celle du système carte-personne) évoluent de façon indépendante, comme si elles appartenaient à deux univers parallèles. Quand l'expérience est répétée, les habitants de la majorité des uni-



vers parallèles voient tomber la carte du côté face environ la moitié du temps. L'arrangement des cartes (*en haut à droite*) montre les 16 univers parallèles obtenus lors du tirage simultané de quatre cartes.



les prédictions s'accordaient avec précision aux résultats des expériences. Toutefois, on se demandait vaguement si une équation encore inconnue ne décrivait pas quand et comment la réduction se produit. Certains physiciens interprétaient l'absence de cette équation comme l'indication d'une erreur de la mécanique quantique, laquelle serait bientôt remplacée par une théorie meilleure comblant ce manque. Aussi, plutôt que de s'appesantir sur les conséquences ontologiques des équations, la plupart des physiciens passèrent outre pour se consacrer à de multiples applications passionnantes ou aux problèmes non résolus de la physique nucléaire.

Cette approche pragmatique se montra fructueuse. Grâce à la mécanique quantique, on put prédire l'antimatière, comprendre la radioactivité (et maîtriser l'énergie nucléaire), expliquer le comportement des solides, tels les semi-conducteurs (d'où est née l'électronique), prévoir la supraconductivité, décrire les interactions de la lumière et de la matière (aboutissant à la découverte des lasers) ou celles

des ondes radio et des noyaux d'atomes (conduisant à l'imagerie médicale par résonance magnétique), etc. De nombreux succès de la théorie quantique font intervenir l'un de ses prolongements : la théorie quantique des champs ; cette théorie est le fondement de la physique des particules, et ce depuis l'origine jusqu'aux défis expérimentaux actuels que sont les oscillations de neutrinos, la recherche du boson de Higgs et la supersymétrie.

Des univers parallèles

Après une telle moisson de succès, il devint clair, au début des années 1950, que la théorie quantique était bien plus qu'un bricolage théorique temporaire. Ainsi, vers le milieu de la décennie, Hugh Everett, à l'Université de Princeton, décida de réexaminer le postulat de la réduction du paquet d'ondes dans sa thèse de doctorat. Il poussa l'idée quantique à sa limite en se demandant ce qui se passerait si l'évolution de l'Univers restait unitaire. En effet, si la mécanique quantique suffit pour décrire

l'Univers, l'état de celui-ci peut être représenté par une fonction d'onde (d'une extraordinaire complexité). Pour Everett, cette fonction d'onde devait évoluer d'une façon déterministe, ce qui excluait le mystérieux phénomène non unitaire de la réduction du paquet d'ondes : Dieu ne jouerait pas aux dés.

Au lieu de subir une réduction, les états de superposition d'un système microscopique s'amplifieraient rapidement au cours de la mesure jusqu'à donner des superpositions macroscopiques. Ainsi, la carte quantique évoquée plus haut serait vraiment à deux endroits à la fois. En outre, une personne qui la regarderait entrerait elle aussi dans une superposition de deux états mentaux différents, chacun ayant perçu l'un des résultats. Si vous aviez parié que la reine tomberait à l'endroit, vous vous retrouveriez dans une superposition d'un état de satisfaction et d'un état de déception. La brillante idée d'Everett a été de dire que les observateurs de ce monde quantique, aussi déterministe que schizophrène, percevraient pourtant la bonne vieille réalité univoque à

La décohérence, ou comment le quantique devient classique

IDÉE : Même d'infimes interactions du système étudié avec son voisinage immédiat suffisent à dissiper rapidement le caractère quantique d'un état de superposition.

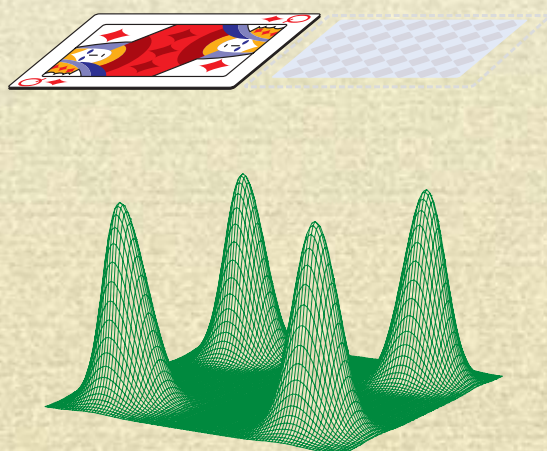
AVANTAGES : Cette idée peut être testée expérimentalement. Elle pourrait expliquer pourquoi le monde environnant nous apparaît classique et non quantique.

AVERTISSEMENT : Le phénomène de décohérence n'élimine pas le besoin d'une interprétation de la mécanique quantique, par exemple l'interprétation de Copenhague ou celle des univers parallèles.

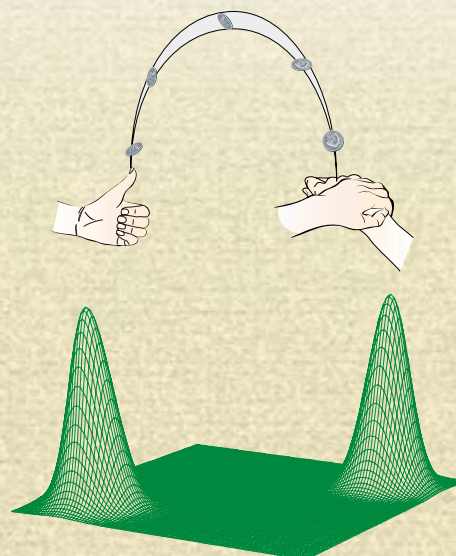
L'incertitude statistique qu'engendre un état de superposition quantique (*à gauche*) diffère de celle qu'engendre une situation classique, comme un tirage à pile ou face (*à droite*). Cela se traduit formellement par un objet mathématique qu'on appelle opérateur densité. Ainsi, la fonction d'onde d'une carte quantique dans un état superposé se déduit d'un opérateur densité à quatre pics. Deux d'entre eux représentent la probabilité

quantique de voir la carte tomber soit pile soit face ; les deux autres pics indiquent que les deux derniers états peuvent en principe interférer, mais l'état quantique reste cohérent. En revanche, l'opérateur densité d'un tirage à pile ou face ne présente que les deux premiers de ces pics, ce que l'on interprète en disant que la pièce est soit pile soit face, même si l'on n'a pas encore vérifié.

INCERTITUDE QUANTIQUE

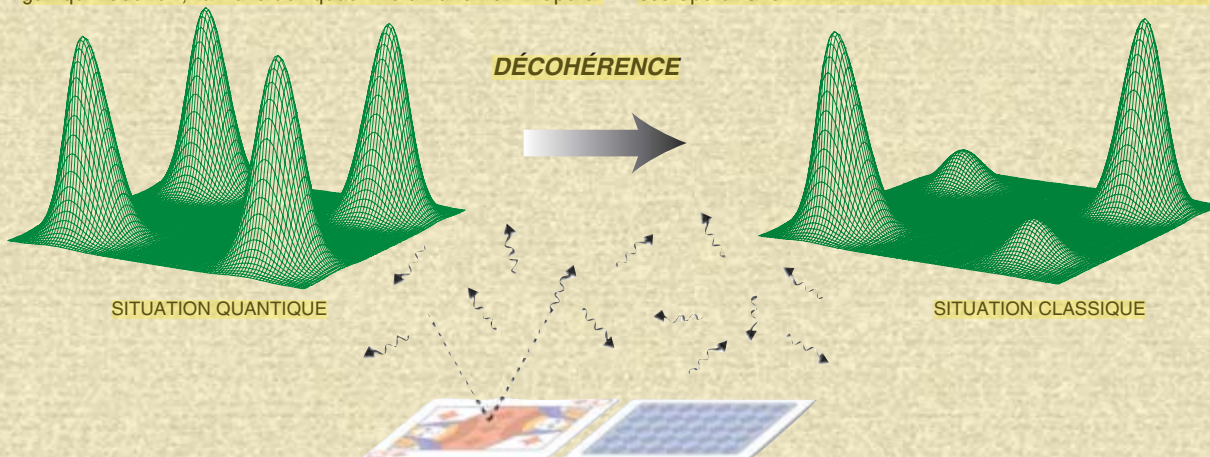


INCERTITUDE CLASSIQUE



La théorie de la décohérence révèle qu'une interaction, même infime, avec l'environnement, par exemple la réflexion d'un unique photon sur la surface de la carte ou une molécule de gaz qui rebondit, fait évoluer quasi instantanément l'opéra-

teur densité d'un système quantique vers une forme très proche de l'opérateur densité classique d'un tirage à pile ou face. L'équation de Schrödinger s'applique tout au long de ces opérations.



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»