

tellement inhabituelle que le jury d'examen sollicita des avis extérieurs. Consulté, Einstein donna un avis favorable, et la thèse fut acceptée.

En novembre 1925, Erwin Schrödinger vint donner un séminaire à Zurich sur les travaux de Louis de Broglie. Quand il eut terminé, Peter Debye lui demanda : « Vous parlez d'ondes, mais où est l'équation d'onde ? » Schrödinger se mit au travail, et c'est alors qu'il élaborait sa célèbre équation, devenue le fondement de tant de domaines de la physique moderne. Peu de temps après, Max Born, Pascual Jordan et Werner Heisenberg donnèrent une formulation équivalente de la théorie quantique, sous forme matricielle. Une fois ces solides fondements mathématiques établis, la mécanique quantique fit des progrès fulgurants. En quelques années, les physiciens expliquèrent une multitude de résultats expérimentaux, y compris dans les spectres d'atomes plus compliqués et dans les réactions chimiques.

Que signifiait tout cela ? Quelle était cette « fonction d'onde », que décrivait l'équation de Schrödinger ? Aujourd'hui encore, ce concept de la mécanique quantique est controversé.

Born avait compris que la fonction d'onde devait être interprétée en termes de probabilités. Quand les expérimentateurs déterminent la position d'un électron, la probabilité qu'ils le trouvent en un endroit donné dépend de l'amplitude de la fonction d'onde en ce lieu (en fait, du carré de cette amplitude). Ainsi, le hasard semblait érigé au rang de loi de la nature. Einstein appréciait peu cette idée et il exprima sa préférence pour un Univers déterministe par cette célèbre formule : « Je ne peux pas croire que Dieu joue aux dés. »

Chats bizarres et cartes quantiques

Schrödinger lui aussi était réticent. Les fonctions d'onde décrivaient des combinaisons d'états différents, que l'on nomme des superpositions. Un électron, par exemple, pouvait se trouver dans une superposition de plusieurs localisations. Schrödinger fit remarquer que si des objets microscopiques, tels que des atomes, peuvent se trouver dans des superpositions, il pourrait en être de même pour des objets macroscopiques, puisque ceux-ci sont constitués d'atomes. Pour illustrer cette

idée, il imagina une expérience, restée célèbre depuis, où un dispositif pervers tue un chat si (et seulement si) un atome instable se désintègre. Comme l'atome radioactif va se trouver dans une superposition d'un état désintégré et d'un état non désintégré, il produit un chat à la fois vivant et mort, en superposition des deux.

On peut imaginer une variante simple de cette expérience imaginaire. Vous prenez une carte à jouer que vous placez en équilibre sur la tranche. En physique classique, une telle carte reste, en principe, indéfiniment en équilibre. En revanche, l'équation de Schrödinger prédit que la carte tombera en quelques secondes (quels que soient vos efforts pour la maintenir en équilibre) et, qui plus est, qu'elle tombera des deux côtés à la fois dans une superposition d'un état « vers la gauche » et d'un état « vers la droite ».

Bien sûr, en physique classique, la carte tombe aléatoirement soit vers la droite, soit vers la gauche, mais jamais à la fois « vers la droite et vers la gauche », comme semble l'indiquer l'équation de Schrödinger. Manifestement, un système aussi macroscopique qu'une carte « refuse » de rester dans un état de superposition quantique. Il y a là une contradiction apparente qui est au cœur de l'un des principaux mystères de la mécanique quantique.

L'interprétation de la mécanique quantique dite « de Copenhague » est née des discussions qui eurent lieu entre Bohr et Heisenberg à la fin des années 1920 ; elle traite le mystère quantique en question en supposant que les observations ou les mesures ont un rôle très spécial. Tant que l'on n'observe pas la carte qui tombe, sa fonction d'onde évolue en obéissant à l'équation de Schrödinger. Les physiciens qualifient cette évolution régulière et continue d'« unitaire ». Le caractère unitaire de l'évolution produit une superposition quantique qui fait tomber la carte à la fois vers la droite et vers la gauche ; toutefois, au moment où l'on observe le système, la fonction d'onde subit un changement brusque vers un des états interprétables classiquement. C'est ce que l'on appelle la réduction de la fonction d'onde. Un observateur voit la carte dans un état bien défini (soit à droite, soit à gauche) et, dès lors, seule la composante de la fonction d'onde correspondant à cet état classique subsiste. Tout se passe comme si la nature sélectionnait au hasard l'un des états possibles, selon une probabilité imposée par la fonction d'onde.

L'interprétation de Copenhague fournissait une « recette » étonnamment efficace pour des calculs dont

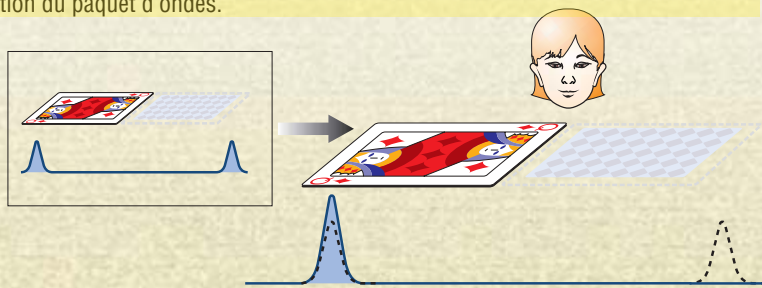
L'interprétation de Copenhague

IDÉE : Les observateurs voient des résultats au hasard ; les probabilités correspondantes sont données par la fonction d'onde.

AVANTAGE : On n'observe qu'un unique résultat, et il est observable.

INCONVÉNIENT : On suppose l'existence d'un mécanisme de « réduction » de la fonction d'onde, sans qu'aucune équation précise quand et comment il se met en place.

Quand nous mesurons l'état d'un système placé dans une superposition quantique de deux états observables, nous obtenons l'un ou l'autre des deux états de la superposition, et la probabilité est imposée par la fonction d'onde. Une personne pariant que la carte tombe vers la droite a une chance sur deux de gagner. Les physiciens acceptent cette interprétation avec pragmatisme, même si elle implique que la fonction d'onde change brusquement, subissant une réduction du paquet d'ondes.



Laurie Grace

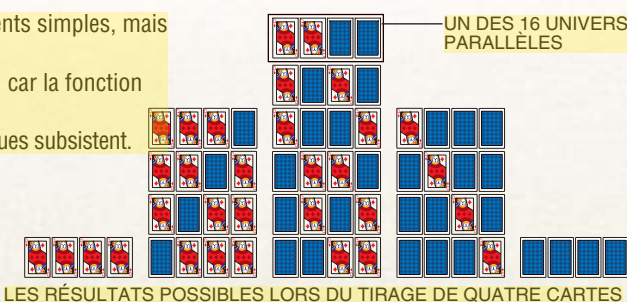
L'interprétation des univers parallèles

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.

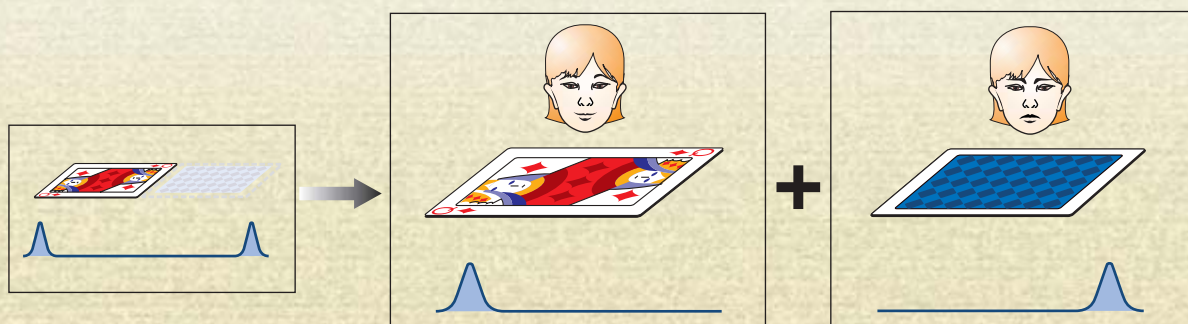
PROBLÈMES : L'idée est étrange, et certaines difficultés techniques subsistent.

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-



LES RÉSULTATS POSSIBLES LORS DU TIRAGE DE QUATRE CARTES

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