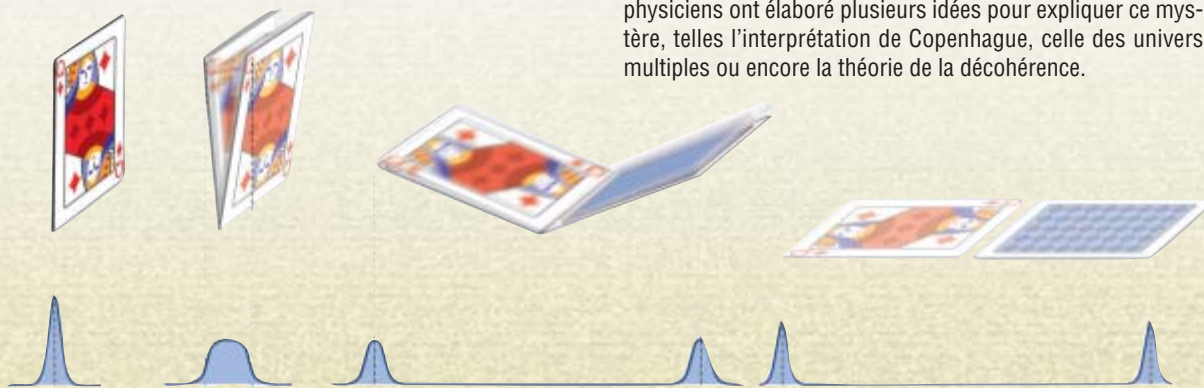


Des cartes quantiques

Interprétée du point de vue quantique, la chute d'une carte à jouer est un phénomène mystérieux.

En théorie quantique, une carte parfaite posée sur la tranche tombe des deux côtés à la fois quand on la lâche ; une fois tombée, elle est dans un état de superposition. La fonction d'onde quantique de la carte (*en bleu*) passe uniformément et continûment de l'état d'équilibre instable (*à gauche*) à un état final d'équilibre aux caractéristiques étonnantes (*à droite*) : la carte y est présente sur ses deux côtés à la fois ! En pratique,

une telle expérience est impossible avec un objet macroscopique, telle une carte, mais ce type de situations a été mis en évidence avec des particules, des électrons, des atomes et même avec des objets plus gros. Quelle est la signification de telles superpositions quantiques d'états ? Pourquoi n'en observons-nous pas dans notre monde macroscopique ? C'est là le mystère central de la mécanique quantique. Avec le temps, les physiciens ont élaboré plusieurs idées pour expliquer ce mystère, telles l'interprétation de Copenhague, celle des univers multiples ou encore la théorie de la décohérence.



Laurie Grace

(un corps noir) en se plaçant dans le cadre classique, ils ne retrouvaient pas le spectre mesuré. Les calculs prédisaient même une absurde «catastrophe ultraviolette», c'est-à-dire une intense émission de rayons ultraviolets et X, susceptible d'aveugler quiconque regarderait, par exemple... un poêle !

Le désastre de l'hydrogène

Dans un article daté de l'année 1900, Planck donna l'expression correcte du spectre du corps noir. Toutefois, sa démonstration s'appuyait sur une hypothèse tellement étrange que lui-même la renia pendant plusieurs années : il avait dû admettre que son corps noir n'émettait de l'énergie que par petites bouffées, par «quanta». Cette singulière hypothèse allait se révéler extrêmement fructueuse. En 1905, Albert Einstein poussa l'idée un peu plus loin. Il voulait expliquer l'effet photoélectrique, utilisé aujourd'hui dans les cellules photoélectriques et dans les capteurs des caméras numériques (CCD) : il supposa que le rayonnement électromagnétique transporte, lui aussi, l'énergie par petits grains, les photons.

Dès 1911, les physiciens furent confrontés à une autre difficulté : Ernest Rutherford les avait convaincus que les atomes sont constitués d'électrons

en rotation autour de noyaux chargés positivement, à la façon de minuscules systèmes solaires. Toutefois, la théorie classique de l'électromagnétisme de Maxwell stipulait qu'une particule chargée en mouvement perd de l'énergie par rayonnement. Ainsi, les électrons en orbite autour du noyau auraient dû perdre leur énergie en moins d'un millionième de millionième de seconde et être «aspirés» par le noyau. Impossible, puisque les atomes d'hydrogène sont stables. C'était le pire des camouflets que la physique avait jamais subi, puisque l'électromagnétisme prédisait la durée de vie des atomes d'hydrogène avec une erreur de 40 ordres de grandeur !

En 1913, le Danois Niels Bohr vint travailler avec Rutherford à l'Université de Manchester, et trouva une explication qui, une fois encore, faisait appel aux quanta. Il postula que le moment angulaire des électrons ne pouvait prendre que certaines valeurs bien précises, ce qui confinait les électrons sur quelques orbites discrètes (aux énergies bien précises). Les électrons ne peuvent plus libérer de l'énergie qu'en sautant de leur orbite vers une orbite inférieure : ils émettent alors un photon. Ce modèle expliquait aussi la stabilité de l'atome d'hydrogène : un électron parvenu sur l'orbite la plus

basse y reste, car il ne peut plus sauter sur une orbite d'énergie inférieure.

Ce «modèle de Bohr» expliquait non seulement la stabilité atomique, mais aussi la structure du spectre de cet élément, c'est-à-dire les fréquences spécifiques d'émission des atomes d'hydrogène excités. Il s'appliquait aussi à l'hélium, mais seulement quand cet atome était dépourvu de l'un de ses deux électrons.

De retour à Copenhague, Bohr reçut une lettre de Rutherford l'enjoignant de publier ses résultats. Il répondit à Rutherford que personne ne le croirait tant qu'il n'aurait pas réussi à expliquer le spectre de tous les éléments. «Bohr, vous expliquez l'hydrogène et vous expliquez l'hélium, et l'on vous croira pour le reste», insista Rutherford.

Malgré les premiers succès de l'idée quantique, les étranges règles de quantification embarrassaient les physiciens du début des années 1920, car aucune loi générale ne s'appliquait. En 1923, Louis de Broglie en proposa une dans sa thèse de doctorat. Il considérait que les électrons et les autres particules se comportent comme des ondes stationnaires. De telles ondes, tout comme les oscillations d'une corde de guitare, ont des fréquences discrètes (quantifiées), c'est-à-dire qui ne prennent que des valeurs bien précises. L'idée était

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

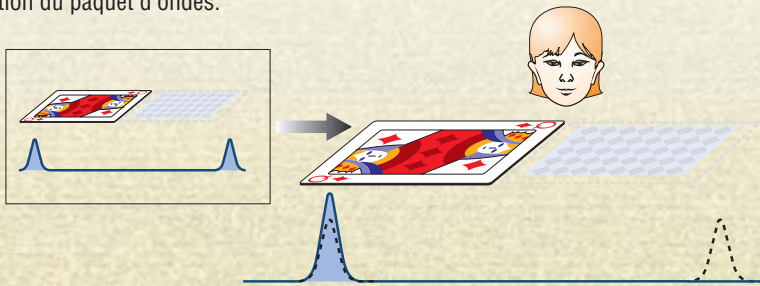
L'interprétation de Copenhague

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