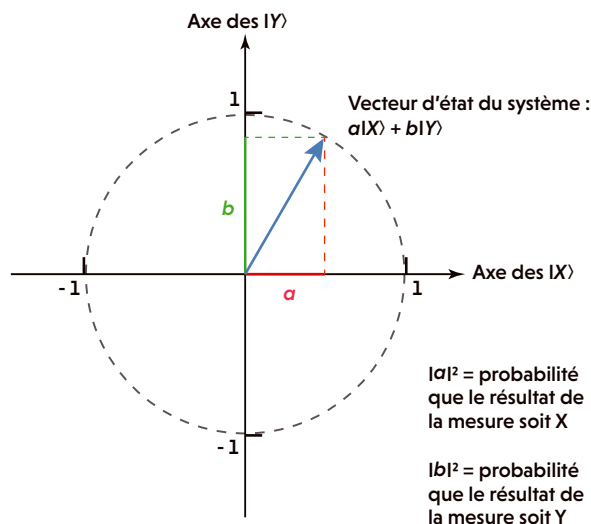


LA RÈGLE DE BORN

La théorie quantique décrit l'état d'un système physique par un vecteur d'un certain espace abstrait. En général, ce vecteur s'écrit comme la somme de plusieurs vecteurs (ou états) de base orthogonaux entre eux et de norme (ou longueur) égale à 1, chacun correspondant à une valeur bien déterminée d'une même grandeur physique (position ou énergie par exemple) et étant affecté d'un certain coefficient. La règle



de Born donne la probabilité de trouver telle ou telle valeur lors d'une mesure en fonction des coefficients des vecteurs

de base dans la somme décrivant l'état du système. Elle stipule que la probabilité de trouver une valeur est égale

au carré du coefficient de l'état de base correspondant (plus précisément au carré du module du coefficient, qui peut être un nombre complexe). La somme des carrés des coefficients représente la somme des probabilités des résultats possibles, et doit donc être égale à 1. C'est pourquoi on demande que le vecteur d'état soit de norme égale à 1. Ainsi, si l'on mesure la position d'un électron dans l'état $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$, on le trouvera soit en X, soit en Y avec une probabilité $1/2$. Si l'on mesure la position d'un électron dont l'état est $1/\sqrt{3}|X\rangle + \sqrt{2/3}|Y\rangle$, on le trouvera en X avec la probabilité $1/3$ et en Y avec la probabilité $2/3$. Le schéma ci-contre illustre la règle de Born pour un système à deux états de base et avec des coefficients réels a et b (en toute généralité, ils sont complexes).

> et qui est souvent exemplifié par le fameux chat de Schrödinger à la fois mort et vivant: le problème de la mesure des grandeurs physiques.

Cette question de la mesure est étroitement liée à celle de la réalité. La plupart des physiciens considèrent que l'on devrait pouvoir comprendre le monde quantique de façon objective, c'est-à-dire sans faire aucune référence à nous-mêmes: nous sommes supposés être des observateurs passifs, qui se contentent de prendre acte de phénomènes se déroulant dans une réalité extérieure et indépendante de nous. Cette attitude est naturelle. La mécanique classique nous a habitués à raisonner ainsi et, dans l'attitude scientifique traditionnelle, on considère l'objectivité comme une valeur déterminante.

Mais si le concept de mesure ne pose aucun problème en physique classique, il soulève de grandes difficultés en physique quantique. Ce sont ces difficultés que je vais analyser. Elles conduisent à remettre en cause l'existence objective, en l'absence de tout observateur, de valeurs définies pour les grandeurs caractérisant un système physique. Je vais ensuite présenter et défendre une idée plutôt surprenante: c'est seulement lorsqu'un observateur prend conscience de sa mesure qu'une valeur définie de la grandeur mesurée émerge, et celle-ci n'implique aucun changement dans l'état physique du système, mais est relative à l'observateur lui-même.

D'une certaine manière, les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique ont pour origine fondamentale le «principe de superposition». Expliquons en quoi celui-ci consiste.

Dans la théorie quantique, on représente les états des systèmes physiques par des objets

mathématiques qui sont des vecteurs dans un certain espace aux propriétés convenables (un «espace de Hilbert»). On utilise aussi parfois le terme de «fonction d'onde» pour désigner le vecteur caractérisant l'état du système. Par exemple, l'état de position d'un électron qui se situe dans la région X sera représenté par un vecteur qu'on a l'habitude de noter $|X\rangle$; celui d'un électron situé dans la région Y sera $|Y\rangle$.

L'ORIGINE DES DIFFICULTÉS

Or le principe de superposition stipule que si deux états quantiques sont possibles, alors toute combinaison linéaire (c'est-à-dire une somme pondérée) des deux vecteurs d'état correspondants représente elle-même un état possible. Ainsi, selon ce principe, si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont des états possibles (et bien distincts) du système, l'état $a|X\rangle + b|Y\rangle$, où a et b sont des coefficients numériques, est également un état possible.

Prenons l'exemple de la combinaison linéaire $|X\rangle + |Y\rangle$, où les coefficients sont égaux (en fait, pour des raisons de normalisation liées à la règle de Born – voir l'encadré ci-dessus –, un tel vecteur doit avoir une longueur 1 et il faudrait donc l'écrire $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$ si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont eux-mêmes de longueur 1 et orthogonaux; mais, pour simplifier, nous omettrons les facteurs de normalisation). À quoi correspond un tel état? Où se trouve un électron dont l'état est décrit par cette somme?

Aucune réponse conforme à une description usuelle n'est possible. On peut montrer qu'il est tout aussi faux de dire que l'électron est «à la fois» en X et en Y, qu'il est «tantôt» en X et «tantôt» en Y, qu'il est à mi-chemin

LINÉARITÉ ET UNITARITÉ

En mécanique quantique, l'espace des états d'un système est un espace vectoriel aux propriétés adéquates, un « espace de Hilbert ». Ses éléments, qui représentent l'état d'un système, sont des vecteurs. Une fonction linéaire f sur cet espace transforme un vecteur en un autre vecteur avec la propriété suivante : quels que soient les vecteurs V et W et la combinaison linéaire $aV + bW$, où a et b sont des nombres complexes quelconques, on a $f(aV + bW) = af(V) + bf(W)$. L'équation de Schrödinger, qui régit l'évolution au cours du temps du vecteur d'état du système physique considéré, correspond à une transformation linéaire. Cette transformation est de plus unitaire, ce qui signifie qu'elle transforme un vecteur en un autre vecteur de même norme (ou longueur). Il en résulte que l'évolution d'un état superposé (combinaison linéaire de deux vecteurs non proportionnels) ne peut jamais donner un état proportionnel à un seul de ces deux vecteurs. C'est pourquoi l'équation de Schrödinger ne peut « projeter » une superposition d'états sur l'un de ces états, et ne peut donc pas expliquer la « réduction du paquet d'ondes » qui se produit lors d'une mesure et qui assure que le résultat de la mesure soit univoque.

entre X et Y , ou qu'il est en toute autre position définie, quelle qu'elle soit. On est en fait conduit à considérer qu'un tel électron n'a tout simplement aucune position définie, ce qui est très choquant pour notre intuition, laquelle nous a habitués à avoir la certitude que tout objet occupe une position bien définie dans l'espace à tout moment !

Cette conclusion étrange n'est pas réservée à la position, mais s'applique à toutes les grandeurs physiques, par exemple la vitesse, l'énergie ou le moment cinétique. Dans les superpositions d'états, certaines grandeurs n'ont tout simplement aucune valeur définie.

Si l'on observe un électron qui se trouve dans l'état $|X\rangle$, on le détectera en X . Si l'on observe un électron qui se trouve dans l'état $|Y\rangle$, on le détectera en Y . Mais alors, où détectera-t-on un électron qui se trouve dans l'état $|X\rangle + |Y\rangle$? La réponse est que si l'on observe successivement un grand nombre d'électrons, tous dans ce même état, on en détectera statistiquement la moitié en X et l'autre moitié en Y (en raison de l'égalité des coefficients des deux termes entrant dans la superposition – voir l'encadré sur la règle de Born).

Pourtant, cela ne veut pas dire que la moitié des électrons dans cet état sont situés en X et l'autre moitié en Y avant même qu'on les détecte. Les lois quantiques montrent en effet que si c'était le cas, on n'observerait pas les interférences produites dans certaines situations par un état superposé. Il faut donc considérer qu'aucun de ces électrons n'occupe de position définie avant qu'on le détecte : c'est au moment où on fait le nécessaire pour le détecter que la position se détermine, avec une probabilité $\frac{1}{2}$ d'être en X ou en Y .

DEUX PRÉCEPTES QUI NE CONDUISENT PAS AU MÊME RÉSULTAT

Par ailleurs, la théorie quantique énonce deux postulats relatifs à l'évolution d'un système. Le premier est l'équation de Schrödinger, une équation différentielle qui régit la variation de l'état du système au cours du temps. Elle a la particularité d'être linéaire et unitaire (voir l'encadré ci-contre), ce qui a pour conséquence qu'elle transforme toute superposition d'états en une autre superposition contenant les mêmes états. Elle ne fera donc jamais passer l'état $|X\rangle + |Y\rangle$ à l'état $|X\rangle$ ou à l'état $|Y\rangle$, lesquels correspondent à des états de position bien déterminée. Il s'ensuit que l'équation de Schrödinger ne permettra jamais d'expliquer pourquoi, lorsqu'on observe un électron dont l'état est $|X\rangle + |Y\rangle$, on le trouve soit en X , soit en Y avec une probabilité $\frac{1}{2}$.

L'autre moyen fourni par la théorie quantique pour déterminer l'évolution d'un système est le « postulat de réduction du paquet

d'ondes ». Il s'applique à l'acte de mesure, sur le système, de toute grandeur physique.

Ce postulat stipule que si le système est dans une superposition d'états dont chacun correspond à une valeur bien définie d'une grandeur physique, la mesure de cette grandeur fournira l'une de ces valeurs comme résultat, avec une probabilité déterminée par le coefficient de l'état correspondant dans la superposition, conformément à la « règle de Born » (voir l'encadré page précédente).

De plus, le même postulat affirme qu'après la mesure, l'état du système se trouve réduit au vecteur qui correspond à la valeur obtenue. C'est la « réduction (ou effondrement) du paquet d'ondes ». Dans notre exemple de superposition d'états de position, les coefficients des deux états étant identiques, le postulat prédit que l'on trouvera l'électron en X ou en Y avec la même probabilité $\frac{1}{2}$, et jamais une autre position, et que si l'on trouve par exemple X , le système passe brutalement, sous l'effet de la mesure, de l'état superposé $|X\rangle + |Y\rangle$ à l'état $|X\rangle$; on dit que l'état superposé est « projeté » sur l'état $|X\rangle$.

Une mesure sur un système physique fait bien sûr intervenir un appareil de mesure. Mais les deux moyens mentionnés ci-dessus de déterminer l'évolution du système fournissent des résultats différents, même lorsqu'on applique l'équation de Schrödinger conjointement au système et à l'appareil qui le mesure. Cela ne serait pas problématique si l'on était capable de dire clairement quand on doit utiliser l'équation de Schrödinger et quand on doit utiliser le postulat de réduction du paquet d'ondes. Au premier abord, la réponse paraît simple : on applique le postulat de réduction du paquet d'ondes lorsqu'on effectue une mesure. Le problème est qu'on ne sait pas définir précisément ce qu'est une mesure dans la théorie quantique !

QU'EST-CE QU'UNE MESURE ?

Or savoir ce qu'est une mesure est la question la plus fondamentale, celle dont la réponse sépare nettement les physiciens en deux camps. Est-ce simplement le fait que la valeur d'une certaine grandeur physique (telle que la vitesse ou la position) soit enregistrée par un appareil indépendamment de tout observateur ? Dans ce cas, l'observateur se contentera de prendre connaissance à un moment ultérieur de la grandeur enregistrée et sera donc un simple témoin passif d'une mesure ; celle-ci ne consiste alors qu'à enregistrer un état de fait préexistant. C'est la situation en mécanique classique, où les valeurs des grandeurs physiques attachées à un système sont à tout moment parfaitement définies et déterminées.

Mais le formalisme de la théorie quantique ne permet ni de penser que la valeur >