

La mesure quantique

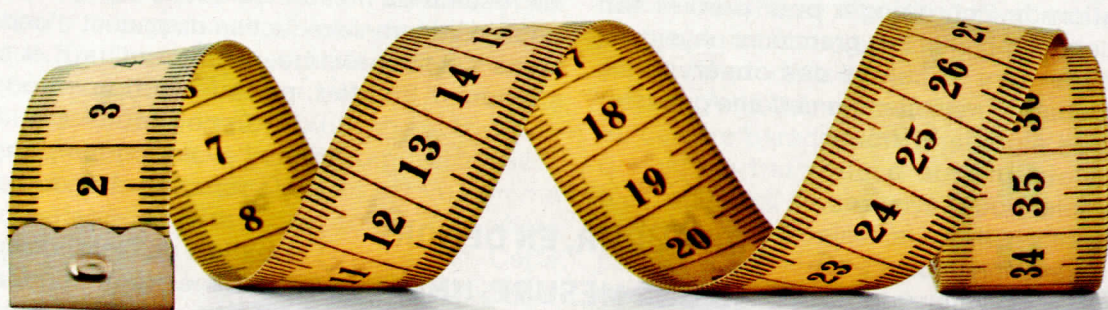
Que signifie mesurer une grandeur physique en mécanique quantique ? Cette question fondamentale suscite aujourd'hui encore de nombreux débats. C'est la notion même de réalité qui est en jeu. Tout a commencé avec Niels Bohr, pour qui la réalité n'existe tout simplement pas sans un acte de mesure.

Le concept de mesure est un concept central en physique quantique. Il se distingue en cela très nettement de sa signification en physique classique. Pour cette dernière, le résultat d'une mesure se rapporte à un état du système tel qu'il était avant la mesure. Si l'on mesure la hauteur d'un mur, il ne fait nul doute pour un esprit classique et cartésien que le résultat obtenu, la hauteur, est une propriété du mur qui préexistait à la mesure. C'est donc une donnée indépendante de l'acte de mesure. La situation est différente en physique quantique, en raison de la nature profondément probabiliste de ses prédictions.

UNE MESURE INCERTAINE

Le problème de la mesure est clairement posé par Niels Bohr à partir de 1927 alors qu'il expose les bases de son interprétation de Copenhague à la communauté des physiciens. Le premier formalisme de la mécanique quantique vient alors d'être élaboré par Heisenberg, Schrödinger puis Dirac. Selon cette interprétation, que l'on qualifie d'orthodoxe, le résultat d'une mesure quantique est totalement probabiliste. Cette caractéristique essentielle apparaît clairement dans le formalisme mathématique appelé désormais mécanique quan-

tique. Une conséquence importante est que l'on ne peut absolument pas prévoir le résultat d'une mesure quantique. À cette époque, aucune confirmation expérimentale de ce postulat n'était possible. Les physiciens avaient alors recours à des expériences de pensée pour exprimer leurs hypothèses et les discuter. Depuis, de nombreuses expériences ont été réalisées dans les laboratoires et ont permis de valider ce postulat. Prenons l'exemple de la mesure de la polarisation d'un photon unique pour illustrer ce type d'expériences. La polarisation est une caractéristique de la lumière, qui correspond à la direction de vibration de son champ électrique. Cette propriété, qui a dans ce cas précis un caractère ondulatoire, peut être mesurée à l'aide d'un analyseur de polarisation, lequel fournit comme résultat une certaine direction. Pour un photon unique, cette propriété ondulatoire demeure, bien qu'on ne puisse plus parler d'onde lumineuse. On peut cependant effectuer une mesure, car les physiciens disposent maintenant de sources capables d'émettre de tels photons, les uns à la suite des autres et tous rigoureusement identiques. On observe alors que la polarisation mesurée pour chaque photon est aléatoire. La mécanique quantique



Pour la physique quantique, la mesure est fondamentale. Elle est le résultat d'un calcul mathématique.

généralise ce résultat à des mesures effectuées sur toutes sortes de grandeurs physiques comme la vitesse, la position ou le spin de l'électron. Cette probabilité liée à toute mesure quantique ne doit pas être considérée comme la conséquence de notre ignorance ou d'une imprécision. Elle est intrinsèque et inévitable.

UNE SUPERPOSITION D'ÉTATS

Quelle est l'origine du caractère probabiliste de la mesure ? La mécanique quantique ne répond pas de manière précise à cette question. En revanche, les mathématiques sur lesquelles elle s'appuie apportent une justification qui déplace le problème légèrement en amont. En mécanique quantique, on décrit une particule à l'aide d'un objet mathématique que l'on appelle fonction d'onde. Celle-ci contient l'ensemble des états possibles de la particule. Si le résultat d'une mesure est obtenu avec une certaine probabilité c'est que la particule avant la mesure se trouve dans une superposition statistique d'états. Autrement dit, le photon se trouve dans une combinaison de toutes les polarisations possibles avant de passer à travers l'analyseur. Pour une mesure donnée, le formalisme attribue une importance relative, un

LA PROBABILITÉ LIÉE À TOUTE MESURE QUANTIQUE NE DOIT PAS ÊTRE CONSIDÉRÉE COMME LA CONSÉQUENCE DE NOTRE IGNORANCE OU D'UNE IMPRÉCISION.

poids, à chacun des états possibles. Naturellement, ce poids correspond à la probabilité d'obtenir un certain résultat lors d'une mesure. Dans ces conditions, l'acte de mesurer consiste à sélectionner, parmi tous les états possibles, un état particulier. Ce passage d'une multiplicité de résultats possibles à un résultat unique porte le nom de « réduction du paquet d'ondes » ou encore « réduction du vecteur d'état ». Cette idée, défendue par les tenants de l'interprétation de Copenhague, ne convenait pas à Einstein, qui a déclaré à plusieurs reprises à ce propos que Dieu ne jouait pas aux dés. Cette question est d'ailleurs au cœur du débat qui l'a opposé Bohr jusqu'à la fin sa vie. Dans ce duel, les réponses apportées par Bohr ont le grand avantage de pouvoir s'appuyer sur un formalisme mathématique solide et cohérent.

UN FORMALISME SUR MESURE

Pour beaucoup de physiciens de l'époque de Bohr, le formalisme orthodoxe de la mécanique quantique est un refuge qui permet d'échapper aux questions d'interprétation, tout en accu-

mulant une quantité exceptionnelle de résultats. Celui-ci s'appuie sur le concept de fonction d'onde pour décrire une particule et sur l'équation de Schrödinger pour prédire son évolution temporelle. Les grandeurs physiques à mesurer sont appelées des observables. Dans ce cadre, mesurer une certaine grandeur physique signifie attribuer une valeur unique à une observable. Nous l'avons vu, ce résultat est aléatoire, mais il appartient néanmoins à un ensemble de valeurs données, que l'on peut déterminer mathématiquement à partir de l'observable choisie. Effectuer une mesure revient à associer par une opération mathématique une

fonction d'onde et une observable. Le résultat de cette opération donne l'ensemble des valeurs possibles de la mesure. Pour obtenir un résultat de mesure unique, il est indispensable d'intégrer la réduction du paquet d'ondes dans ce formalisme. Comment faut-il s'y prendre ? En effet, cette réduction introduit

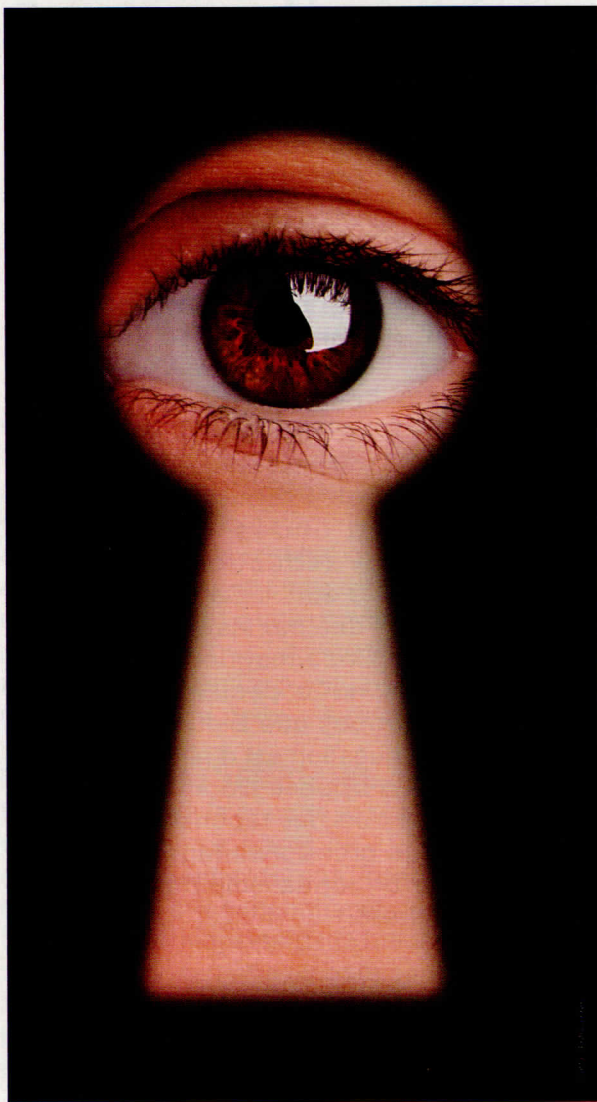
une discontinuité brutale dans l'évolution temporelle de la fonction d'onde telle qu'elle est décrite par l'équation de Schrödinger, qui est linéaire et continue. Pour cela, dans l'interprétation orthodoxe, il n'y a pas d'autre solution que d'ajouter un postulat de réduction à l'équation de Schrödinger. Le problème se pose alors en termes d'interprétation.

POUR BOHR, EN DEHORS D'UNE MESURE, UNE PARTICULE N'A PAS DE RÉALITÉ PHYSIQUE.

La question est de savoir s'il existe un mécanisme de réduction, un processus physique sous-jacent et, si c'est le cas, de quelle manière il agit sur un système mesuré.

MESURER C'EST PERTURBER

Bohr ne donne pas véritablement d'explication à la question de la réduction et de son origine. Selon lui, il faut considérer un acte de mesure comme un effet physique tout à fait particulier. Cette façon d'appréhender la mesure est inédite en physique. En effet, la physique classique ne dispose pas d'un formalisme dédié à la mesure. Celle-ci est supposée pouvoir toujours s'effectuer sans perturber le système mesuré. Au contraire, dans la vision de Bohr, une particule préparée dans un certain état et qui évolue selon l'équation de Schrödinger, subit brutalement l'effet physique de la mesure. Cet effet implique l'obtention d'un résultat unique parmi l'ensemble des valeurs possibles de l'observable mesurée. Or, si l'on effectue une nouvelle mesure identique immédiatement après, la définition d'un bon appareil de mesure est qu'il est censé donner un résultat identique, éventuellement à une marge d'erreur près. Si la fonction d'onde de la particule ne changeait pas après la mesure, le caractère probabiliste de la mesure pourrait conduire à une nouvelle valeur totalement différente, ce qui n'est pas le cas. Pour cette raison, l'état de la particule doit obligatoirement être modifié par la mesure de manière à garantir que toute mesure ultérieure donne un résultat identique. C'est pour cela que l'on dit souvent que mesurer en phy-



La physique quantique nous dit que l'on ne peut pas observer un système sans le perturber.

sique quantique c'est perturber le système. Bohr va plus loin dans son interprétation, puisqu'il remet en question la notion même de réalité physique. Pour lui, en dehors d'une mesure, une particule n'a pas de réalité physique. En plus de donner un résultat, la mesure donne donc une réalité aux objets mesurés... Le problème majeur de l'interprétation de Copenhague est le rôle ambigu attribué à l'appareil de mesure. Celui-ci est vu comme un système physique qui produit des effets irréversibles sur un système quantique. Cette dualité entre deux conceptions de la physique pour une même expérience est problématique. Bohr n'y répond pas explicitement. En 1932, le mathématicien et théoricien John von Neumann propose une théorie de la mesure qui traite les appareils de mesure comme des systèmes quantiques pourvus d'une fonction d'onde. Dans certains cas particuliers, cette approche permet de modéliser le résultat d'une expérience sans avoir recours explicitement à

la réduction du paquet d'ondes. Cependant, dans le cas le plus général, une mesure conduit à la construction d'une chaîne d'objets quantiques constituée d'une somme d'appareils et de systèmes à mesurer dans des états superposés et ne débouchant pas sur une valeur unique. À l'extrême, ce raisonnement conduit au célèbre paradoxe du chat de Schrödinger, qui est mort et vivant à la fois. En réalité, ce n'est que dans les années 1970 qu'une réponse a été donnée pour expliquer la réduction du paquet d'ondes. Il s'agit de la théorie de la décohérence qui fait intervenir l'environnement de la mesure, c'est-à-dire toutes les perturbations extérieures que peut subir le système. Selon cette théorie, l'action de l'environnement a pour effet d'exclure toutes les valeurs possibles sauf une qui est « choisie » comme résultat unique de la mesure. Finalement, l'acte de mesurer une grandeur physique, qui paraît si anodin en physique classique, est loin d'être évident en physique quantique !

À RETENIR

- La mesure est un processus qui fait l'objet d'un traitement privilégié en physique quantique.
- Les premiers travaux sur la mesure quantique sont issus de l'interprétation de Copenhague exposée par Bohr en 1927.
- Le résultat d'une mesure quantique est intrinsèquement probabiliste.
- La mécanique quantique autorise un système à se trouver dans une superposition de plusieurs états simultanément.
- Le passage d'une multiplicité de résultats possibles à une valeur unique s'appelle réduction du paquet d'ondes.
- Einstein n'approuvait pas la vision probabiliste de Bohr.
- En mécanique quantique, les grandeurs physiques à mesurer sont appelées des observables.
- Le résultat d'une mesure provient d'une opération mathématique impliquant la fonction d'onde et une observable.
- La fonction d'onde d'un système est modifiée par une mesure quantique.
- Bohr considère que toute réalité physique n'existe pas en dehors d'un acte de mesure.
- Von Neumann établit en 1932 une théorie de la mesure qui considère les appareils comme des systèmes quantiques.
- La théorie de la décohérence propose une origine physique à la réduction du paquet d'ondes.