

En 1871, les physiciens avaient toutes les raisons d'être optimistes. Avec la mécanique classique et la théorie de l'électromagnétisme, ils pensaient décrire la quasi-totalité des systèmes physiques, à quelques petits détails près... où se cachait le diable ! Ainsi, quand ils calculaient le spectre de la lumière émise par un objet chaud (un corps noir) en se plaçant dans le cadre classique, les résultats prédisaient une absurde « catastrophe ultraviolette », une intense émission de rayons ultraviolets et X, susceptible d'aveugler quiconque regarderait, par exemple, un poêle à charbon ! La solution vint près de trente ans plus tard, quand Max 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 et donner naissance à la physique quantique. En un siècle, elle est devenue la théorie fondamentale des particules de matière constituant les objets de l'Univers et des champs de force animant ces objets. Pour efficace qu'elle soit, elle n'en met pas moins en scène des idées et des concepts parfois déroutants. Petit tour d'horizon.

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

En s'appuyant sur les travaux d'Einstein sur l'effet photoélectrique, Louis de Broglie a postulé que la lumière est constituée d'ondes lumineuses et de corpuscules (des photons). De là est née la notion de dualisme entre onde et particule : tous les objets physiques présentent des propriétés parfois d'ondes et parfois de corpuscules. Les unes ou les autres se manifestent selon le dispositif de mesure.

SUPERPOSITION

Un système microscopique, par exemple un atome – qui est comme la lumière à la fois onde et particule – peut, à l'instar d'une onde, se trouver en plusieurs endroits à la fois ; il peut aussi être en même temps dans des états d'énergies ou de polarisation différentes.

INDÉTERMINISME

Conséquence de la dualité onde-corpuscule, la physique quantique est de nature probabiliste. L'onde associée à une particule est en fait une onde de probabilité (la fonction d'onde) : son intensité correspond à la probabilité de trouver la particule en un endroit ou dans un état donné. Plus encore, le principe d'incertitude de Heisenberg édicte que plus notre connaissance d'une certaine propriété d'un système est précise, plus notre connaissance de certaines autres propriétés du même système sera imprécise. La détermination précise de la position d'une particule, par exemple, implique que celle de sa vitesse devient imprécise.

FONCTION D'ONDE

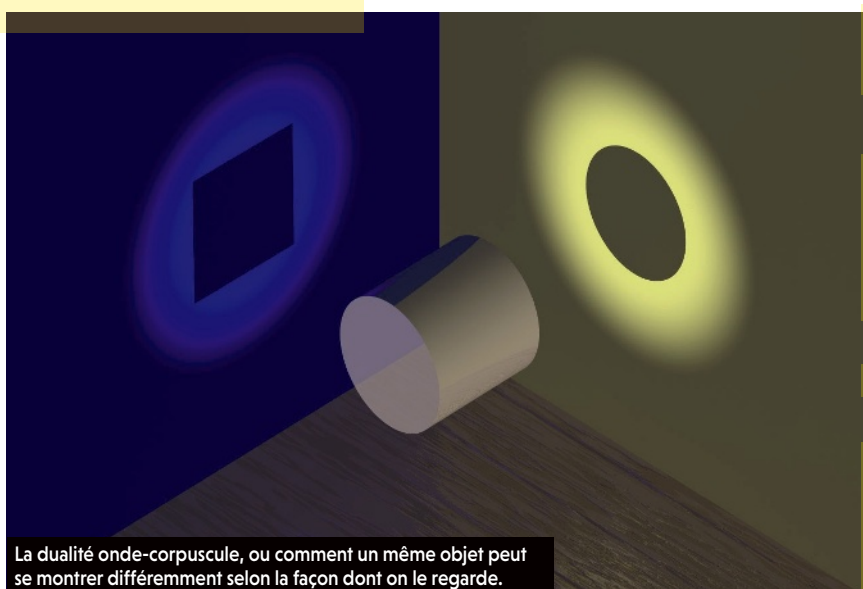
Calculée à partir de l'équation de Schrödinger, elle indique la probabilité de trouver une particule en un point. Ce n'est qu'en faisant la mesure que l'on sait où elle se trouve. Outre la position, cette incertitude concerne également d'autres grandeurs physiques comme la vitesse, l'énergie, le moment cinétique, le spin...

EFFONDREMENT DE LA FONCTION D'ONDE, OU DÉCOHÉRENCE

Une superposition quantique de multiples états ne peut se maintenir qu'avec un système isolé. Toute tentative d'observation ou de mesure d'une particule entraîne automatiquement son effondrement en un état unique, autrement dit le choix d'une possibilité.

INTRICATION

Les parties d'un système quantique ayant interagi, par exemple une paire de photons, restent liées : les mesures faites sur l'une ont un effet immédiat sur les résultats des mesures faites sur l'autre, même quand ces parties sont très éloignées. Les états des deux parties sont corrélés sans qu'aucun signal ne soit échangé entre elles.



La dualité onde-corpuscule, ou comment un même objet peut se montrer différemment selon la façon dont on le regarde.

INÉGALITÉS DE BELL

Farouche opposant à l'idée d'intrication quantique, Albert Einstein a en 1935, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, formulé ses objections sous la forme d'un paradoxe (noté EPR). Selon ces trois physiciens, l'intrication quantique implique soit que les deux particules échangent des informations qui se propagent plus vite que la lumière (ce qui violerait la théorie de la relativité restreinte), soit que la physique quantique est incomplète et que des « variables cachées », inconnues, donnent l'illusion de l'intrication quantique. En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a formalisé la question du paradoxe EPR sous la forme d'inégalités qui portent son nom, et qui sont violées si l'intrication est vraie. Des expériences menées par Alain Aspect en 1982 ont montré que les inégalités de Bell sont bien violées.

CHAT DE SCHRÖDINGER

En 1935, l'Autrichien Erwin Schrödinger, peu satisfait par l'idée de superposition, imagina pour en montrer l'absurdité une situation macabre. Un chat est enfermé dans un local contenant un flacon de gaz mortel, un compteur de radioactivité et un atome radioactif. Si le compteur détecte de la radioactivité, un mécanisme casse le flacon, et le chat meurt. Le compteur, macroscopique, ne peut que mesurer l'un des deux états classiques possibles de l'atome : « désintégré » ou « non désintégré ». Or, dans le monde quantique, un atome peut fort bien se trouver dans un état superposé combinant les états « désintégré » et « non désintégré ». Ainsi, si l'atome radioactif est dans cet état superposé, l'existence du mécanisme brisant le flacon implique que le chat se trouve dans un état combinant la possibilité d'être mort et celle d'être vivant.



SPIN

Les électrons, beaucoup d'autres particules et même des défauts dans le réseau d'atomes de carbone d'un diamant ont un moment cinétique intrinsèque, le spin, un peu comme s'ils étaient de minuscules billes en rotation. À ce spin est associé un moment magnétique. On représente les spins et les moments cinétiques par des vecteurs, orientés vers le haut pour une bille tournant d'ouest en est, et vers le bas dans le sens inverse (voir ci-dessus). Par leur spin, les électrons se comportent comme de minuscules aimants. Depuis 1998, les têtes de lecture des disques durs utilisent, pour détecter les microscopiques domaines magnétiques du disque représentant les

bits d'information, un effet lié au spin, l'effet de « magnétorésistance géante », dont la découverte a valu, en 2007, le prix Nobel de physique au Français Albert Fert et à l'Allemand Peter Grünberg.

GRAVITATION

C'est la seule force de la nature qui ne soit pas décrite de façon cohérente dans le cadre de la physique quantique. Les théoriciens cherchent à résoudre ce problème et à unifier théorie quantique et gravitation, en particulier dans le cadre de la théorie des cordes ou de la gravitation quantique à boucles.

LE BIT QUANTIQUE (QUBIT)

Un bit quantique, ou qubit, est l'unité quantique d'information, l'équivalent du bit classique. Cependant, alors que ce dernier ne peut avoir comme valeur que 0 ou 1, le qubit peut représenter deux états à la fois, 0 et 1, chacun avec une certaine probabilité. On représente les états quantiques d'un qubit avec la sphère de Bloch. N'importe lequel de ces états s'écrit mathématiquement sous la forme $a|0\rangle + b|1\rangle$, où a et b sont des nombres complexes dont la somme des carrés des modules ($|a|^2 + |b|^2$) est égale à 1. On peut donc réécrire a et b en fonction de deux angles (θ et ϕ) qui suffisent à définir n'importe quel état d'un qubit ($\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{-i\phi}\sin(\theta/2)|1\rangle$). L'ensemble des états, placé dans un repère (x, y, z) , forme une sphère, un état ψ étant représenté par une flèche allant du centre de la sphère à un point de sa surface. Une mesure de l'état du qubit donne soit 0, soit 1, avec une probabilité dépendant de la latitude θ du point sur la sphère : si $\theta = \pi/2$ par exemple, on mesure une fois sur deux 1 et une fois sur deux 0. Toutes les opérations sur le qubit correspondent à des rotations du vecteur sur la sphère.

