

La mécanique et l'électrodynamique classiques échouent à expliquer les phénomènes observés à l'échelle atomique, où leurs concepts élémentaires, particules et ondes, perdent leur pertinence. Les objets physiques microscopiques (atomes, électrons, photons...) présentent des caractères mixtes, ondulatoires dans certaines circonstances et particulières dans d'autres. Cette étrange dualité onde-particule rend ambiguë toute image intuitive de ces objets dans l'espace-temps, et oblige la théorie quantique, qui remplace la physique classique à cette échelle, à revêtir un caractère probabiliste irréductible.

La description quantique d'une particule, disons un électron, remplace les notions classiques de vitesse  $\vec{v}$  et de position  $\vec{r}$  par celle de fonction d'onde  $\psi(\vec{r}, t)$ . Elle contient, au temps  $t$ , toute l'information sur l'état quantique de l'électron, au même titre que le couple  $\vec{r}, \vec{v}$  contient toute l'information sur l'état classique d'une particule. Les règles de Born précisent la signification expérimentale de  $\psi(\vec{r}, t)$  : son carré donne la probabilité de trouver l'électron au point  $\vec{r}$  lorsqu'on mesure sa position, et le carré de sa transformée de Fourier donne la probabilité de mesurer sa vitesse.

L'analyse de ces probabilités dévoile le caractère inconciliable des physiques classique et quantique. Par exemple, si l'électron se trouve à un endroit déterminé<sup>1</sup>, alors la mesure de sa vitesse peut donner n'importe quel résultat. Cette propriété typiquement quantique illustre le principe d'incertitude de W. Heisenberg. Par ailleurs, si  $\psi(\vec{r}, t)$  est différente de zéro à deux endroits distincts, impliquant une probabilité également non nulle d'y trouver la particule, on peut se donner une image (ambiguë) de l'électron comme se trouvant simultanément à ces deux endroits.

Comme « outil » servant à calculer les probabilités de mesure de la position et de la vitesse, la fonction d'onde rend compte du caractère particulière de l'électron, tandis que sa variation continue dans l'espace lui confère un caractère ondulatoire. Elle s'interprète donc comme une onde de probabilité qui évolue au cours du temps.

La théorie quantique se voit ainsi assigner une double tâche : (i) Prévoir l'évolution de la fonction d'onde, et (ii) déterminer les résultats de mesure de toute grandeur physique à l'aide de  $\psi(\vec{r}, t)$ . L'équation de Schrödinger<sup>2</sup>  $i\hbar \partial \psi / \partial t = \hat{H} \psi$  et les règles de Born répondent à ces exigences.

La très petite valeur de la constante de Planck  $\hbar$  dans le système d'unités international (éq. 2) explique que les phénomènes quantiques ne sont, en général, observables que pour des objets microscopiques.

1 Car la probabilité de le trouver ailleurs est alors nulle.

2  $\hbar$  est la constante de Planck.

Depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, avec R. Descartes, G. Galilée, C. Huygens et I. Newton, la physique classique<sup>1</sup> décrit l'évolution de particules et d'ondes interagissant entre elles. Ces deux types d'objets sont nettement distincts : alors qu'une particule possède, à un instant donné, une position et une vitesse bien déterminées, une onde remplit tout l'espace, et ses « constituants »<sup>2</sup> ont chacun leur propre vitesse. Un système composite peut comprendre des ondes et des particules, mais aucun objet élémentaire n'est simultanément l'une et l'autre en physique classique.

Les expériences d'interférences permettent d'ailleurs de distinguer sans ambiguïté une onde d'un faisceau de particules classiques : l'onde ou le faisceau sont séparés en deux parties égales en passant à travers un jeu de deux fentes dans un écran, puis se recombinaient avant d'être projetés sur un second écran (fig. 1). Le faisceau donne alors deux taches en face des deux fentes, là où les particules heurtent l'écran. Pour une onde, en revanche, des taches alternativement sombres et claires se font voir sur l'écran de projection. Une analyse détaillée du phénomène dévoile l'origine de cette différence : une particule est, à chaque instant, localisée à un seul endroit, et ne peut donc passer que par l'une ou l'autre des fentes, alors qu'une onde est délocalisée et peut passer simultanément par les deux fentes.

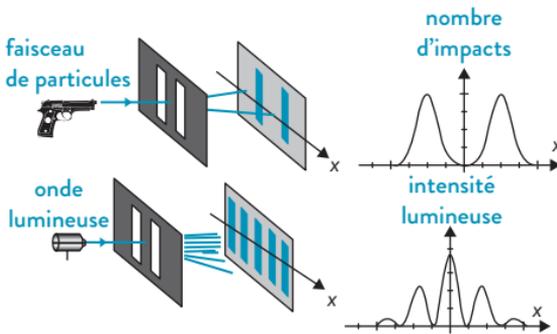


Figure 1

La physique classique repose sur deux idées qui plongent leurs racines dans une philosophie de la nature, élaborée progressivement dans l'Europe de l'époque, indissociables de cette séparation entre ondes et particules : le déterminisme et la continuité.

## ▷ Déterminisme et continuité

**Déterminisme** : si l'état physique d'un objet classique – particule ou onde – est entièrement connu à un instant donné, alors son évolution ultérieure peut

1 « Classique » veut dire : « non quantique ». Dans d'autres contextes le terme est utilisé pour dire : « non relativiste ». Ici nous traitons la physique quantique, soit relativiste, lorsque nous étudions le photon, soit non relativiste lorsque nous étudions l'électron (à des vitesses faibles devant celle de la lumière).

2 Une onde est constituée en général de plusieurs ondes planes monochromatiques, ayant des directions distinctes de leurs vitesses.

être prédite par la théorie. Autrement dit, son état à l'instant initial détermine son état à n'importe quel instant ultérieur. Les théories classiques reposent pour cela sur des équations différentielles : le principe fondamental de la dynamique et les équations de Maxwell de l'électromagnétisme, par exemple.

**Continuité** : les grandeurs physiques classiques, position ou vitesse d'une particule, composante du champ électrique en un point ou énergie, peuvent prendre en principe toutes les valeurs réelles entre  $-\infty$  et  $+\infty$ . On dit qu'elles ont un **spectre** – l'ensemble de valeurs qu'elles peuvent prendre – continu. Lorsque le système évolue, ces grandeurs deviennent des fonctions, également continues, du temps  $t$ . Comme tout processus physique peut se ramener, en dernière analyse, à un échange d'énergie – soit entre deux systèmes, soit entre deux formes d'énergie dans un même système – la continuité se traduit concrètement par le fait suivant : entre deux instants infiniment voisins  $t$  et  $t + dt$ , la quantité d'énergie échangée ne peut prendre qu'une valeur infiniment petite  $dE$ . Aucun saut discontinu d'énergie ne peut se produire en physique classique<sup>3</sup>.

Cette vision d'un ordre régulier et prévisible de l'univers a permis de comprendre les phénomènes observés par les physiciens jusqu'en 1900. À cette date, M. Planck découvre, en étudiant la distribution d'énergie électromagnétique (e.m.) à l'intérieur d'un **corps noir**<sup>4</sup>, que le spectre énergétique des **oscillateurs e.m.**<sup>5</sup> est discontinu : les valeurs possibles de l'énergie d'un oscillateur de pulsation (fréquence  $\times 2\pi$ )  $\omega$  sont :

$$\varepsilon_n = n\hbar\omega \quad (1)$$

où  $n$  est un nombre entier positif ou nul, et  $\hbar$  est la **constante de Planck**<sup>6</sup> :

$$\hbar = 1,055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec.} \quad (2)$$

$\hbar$  est l'une des constantes physiques fondamentales, avec la constante de gravitation universelle, la vitesse de la lumière et la charge de l'électron.

En conséquence, les échanges d'énergie entre les oscillateurs e.m. et le thermostat ne peuvent se faire que de façon discontinue : un oscillateur possédant une énergie  $n\hbar\omega$  à un instant donné passe sans intermédiaire à  $(n-1)\hbar\omega$  à l'instant suivant. Un saut discontinu d'énergie s'est donc produit instantanément au moment de l'échange. Ce résultat est d'autant plus perturbant que l'énergie d'une onde e.m. est proportionnelle à son amplitude : lors de l'échange, l'onde modifie son amplitude d'une valeur finie simultanément en tout point de la boîte. Cette première entaille dans le dispositif bien huilé de la physique classique est devenue une brèche incontournable lorsqu'A. Einstein a interprété ces phénomènes. Il explique le saut d'énergie en supposant que le rayonnement e.m. est constitué de particules élémentaires, les **photons**, qui peuvent être absorbés ou émis instantanément. Lors

3 Sauf cas spécifiques provenant d'une description simplifiée du système considéré.

4 Que l'on peut décrire grossièrement comme une boîte dans laquelle des ondes électromagnétiques sont mises en contact avec un thermostat.

5 Un oscillateur e.m. est une onde de vecteur d'onde et de polarisation donnés.

6 Parfois appelée constante de Planck réduite.

d'une absorption par le thermostat, le rayonnement perd donc une quantité d'énergie égale à celle du photon, valant  $\hbar\omega$ .

Le rayonnement e.m. se manifeste donc maintenant sous une double apparence. D'un côté il présente un caractère ondulatoire, puisque les rayons lumineux produisent des interférences, et d'un autre côté il présente un caractère corpusculaire qui se manifeste par ces sauts d'énergie. La physique classique est incapable de rendre compte de cette **dualité onde-particule**. Cela rend nécessaire une profonde modification de notre compréhension des lois physiques. Cette nécessité est renforcée par une autre expérience, qui est le contrepoint de celle que nous venons d'analyser : dans les années 1920, l'expérience des deux fentes a été tentée avec des électrons. On y a observé des interférences de type ondulatoire. L'électron a donc, lui aussi, cette double nature, et nous verrons qu'il entraîne derrière lui tous les objets physiques.

Analysons quelques conséquences de ce changement. Une expérience qui mesure la position d'un électron le force à se présenter sous sa facette de particule : l'appareil de mesure indique une valeur de position déterminée. Cependant, l'électron a aussi une facette ondulatoire, qui nous empêche de considérer qu'il était localisé, avant la mesure, à l'endroit où on l'a finalement mesuré. Pour s'en assurer, on recommence l'expérience dans les mêmes conditions, c'est-à-dire en préparant à nouveau un électron de la même façon avant une nouvelle mesure. On trouve alors encore une position déterminée (dans la zone où l'onde associée est présente), mais qui n'est pas nécessairement la même que lors de la première mesure. En répétant plusieurs fois cette procédure – préparation + mesure – on obtient une série de résultats qui forment une distribution statistique de positions.

Pour expliquer cette distribution, on est tenté de supposer que la méthode de préparation ne détermine pas complètement l'état de l'électron, et qu'en réalité, avant chaque répétition de la mesure, l'électron était dans un état différent. Cela pourrait expliquer les valeurs mesurées distinctes. Une analyse approfondie récuse cette hypothèse, et l'aspect statistique s'impose finalement comme un caractère irréductible de toute mesure quantique.

L'histoire ne s'arrête pas là. Si au lieu de re-préparer l'électron avant la seconde mesure, on répète l'expérience immédiatement après la première, alors, cette fois, la position mesurée est la même lors des deux mesures. On déduit de tout cela plusieurs conclusions importantes :

## ► Superpositions et fluctuations quantiques

Le résultat d'une mesure quantique présente, en général, des fluctuations statistiques. La grandeur mesurée,  $A$ , est donc caractérisée par sa valeur moyenne  $\langle A \rangle$  et par son écart type (**incertitude**)  $\Delta A$ . Ce dernier traduit l'imprédictibilité du résultat de la mesure : même si l'on connaît exactement, grâce à la préparation, l'état quantique de l'électron avant la mesure, on ne peut pas prévoir quelle valeur va être effectivement mesurée à chaque répétition. Autrement dit, le déterminisme caractéristique de la physique classique est donc également violé.