

1. Qu'est-ce que la mécanique ?

La physique s'intéresse à l'étude des phénomènes naturels qui surgissent autour de nous. Le mot vient du grec *physikos* qui signifie « Nature ». Le but idéal de cette recherche consiste à tout expliquer de manière rationnelle.

Parmi les multiples branches de la physique, la mécanique (du grec *mekhane*, « machine ») se focalise sur les mouvements des objets qu'on observe sous l'effet de causes externes. Historiquement, et dès le XVII^e siècle, le développement de la mécanique marqua la première tentative de rendre compte objectivement, c'est-à-dire à l'aide du formalisme mathématique, des phénomènes. On ne cherche plus à expliquer le *Pourquoi* des choses, comme le faisait Aristote, mais simplement à analyser le *Comment* de leurs comportements sous l'effet d'influences identifiables. En pratique, Galilée étudia la chute des corps en laissant tomber des objets du haut de la tour de Pise ou, plus prosaïquement, sur un plan incliné. Par ces mesures, il fut amené à conclure que la distance parcourue pendant la chute varie comme le carré du temps écoulé. Un autre type de mouvement faisait alors débat, celui des orbites des planètes. Ptolémée avait décrété qu'elles devaient être circulaires parce que le cercle représente la forme idéale. Par des mesures très précises, Kepler prouva que les trajectoires suivent des ellipses ayant un foyer centré sur le Soleil.

Ces deux aspects du mouvement, qui semblent *a priori* étrangers l'un à l'autre, seront unifiés par Newton, qui introduisit la notion essentielle de force responsable du mouvement. Une même cause, en l'occurrence la force de gravitation universelle, est à l'origine des deux phénomènes et les mouvements semblent différents simplement du fait de leurs conditions initiales. Ce fut le premier succès dans l'ambitieux projet des physiciens d'unifier tous les faits naturels. La force de Newton s'applique entre deux objets massifs, elle varie comme l'inverse du carré de la distance qui les sépare. Cette loi a été vérifiée dans de multiples circonstances et il faudra attendre

l'invention de la relativité pour venir la compléter. Elle reste très précisément valide dans les conditions normales, c'est-à-dire celles impliquant des vitesses et des énergies habituelles à l'homme.

La doctrine classique associe donc aux systèmes physiques un certain nombre de grandeurs. Ces variables possèdent toutes une valeur bien définie à chaque instant. L'évolution d'un système au cours du temps est entièrement prédictible lorsqu'on en connaît son état à un instant initial donné. Ceci fonde le déterminisme inhérent aux lois de la physique classique.

Mais au-delà de la gravitation, d'autres forces existent qui donnent lieu à d'autres types de mouvement. Elles seront découvertes au fur et à mesure du progrès scientifique. Or, dès la fin du XIX^e siècle, à l'échelle microscopique, la théorie classique se heurta à des difficultés et des contradictions de plus en plus sévères. Une théorie cohérente se dégagera aux alentours de 1925 avec la fondation de la mécanique quantique qui suit des principes tout à fait nouveaux. Mais il faut avouer que la mécanique classique reste pour nous le prototype du mouvement parce qu'elle traite de faits qu'on ressent tous les jours de manière évidente, et le bon sens sera à l'épreuve pour appréhender les principes de la mécanique quantique opérant dans le monde de l'infiniment petit.

2. Pourquoi quantique ?

L'adjectif quantique vient du latin *quantum* (pluriel *quanta*) signifiant « grain ». Est quantique ce qui se réalise de manière discontinue. Notre expérience quotidienne se limite à des évolutions apparemment continues : quand un objet tombe, il occupe successivement tous les points qui se présentent sur son parcours, sa trajectoire n'est pas hachée. Les choses sont différentes si l'objet considéré est minuscule, en pratique s'il s'agit d'une particule élémentaire. En examinant finement son comportement, on observe une trajectoire s'effectuant par sauts entre un point et le suivant,

et le parcours entre deux points n'est plus analysable. Pour tenter une comparaison, un jet de dés est un processus quantifié, si on ne s'intéresse qu'aux résultats qui se suivent en une énumération. Le mot « hasard » vient de l'arabe signifiant « jeu de dés », et justement la mécanique quantique va nous confronter à ce mystérieux phénomène qu'est le hasard.

Comment en est-on arrivé à ce qui semble être une inutile complication très étrangère à notre expérience quotidienne ? Comme d'habitude en physique, les grandes découvertes naissent de résultats dans un premier temps incompréhensibles. On les appelle parfois anomalies. Mais attention, toutes les anomalies n'annoncent pas une grande découverte ! Elles indiquent le plus souvent une erreur de mesure ou d'interprétation, mais parfois elles débouchent sur une révolution, et c'est bien ce dont il s'agit ici.

Quel était donc le fait incompréhensible qui introduisit la mécanique quantique ? Il découlait d'un phénomène lié au modèle atomique de la constitution de la matière qui émergea à la fin du XIX^e siècle. On venait de mettre à jour l'existence d'un nombre restreint d'éléments chimiques, or la lumière émise par ces éléments posait une troublante énigme.

3. Des spectres d'émission en raies ?

Toute la matière existant dans le monde, terrestre autant que stellaire, est comprise comme construite à partir d'une centaine d'éléments. Ils sont répertoriés dans la fameuse table de Mendeleïev qu'on expose dans les salles de classe. Ces éléments vont du plus simple, l'hydrogène, au plus complexe, l'uranium et au-delà, et chacun émet une lumière caractéristique lors d'une excitation, par exemple quand on le chauffe sous forme gazeuse. Or l'analyse de cette lumière montre que chaque élément possède un spectre propre qui ne couvre pas un intervalle continu entre un maximum et un minimum mais se limite à une série de raies étroites, c'est-à-dire

quelques couleurs bien séparées. Les mesures s'avéraient en contradiction flagrante avec les connaissances de l'époque qui prédisaient un spectre continu prenant son origine dans les vibrations des électrons portés par les atomes.

Les couleurs sont comprises comme fréquences ν (mesurées en Hertz) du rayonnement ou longueurs d'onde λ (mesurées en mètre), sachant que $\lambda = c/\nu$, où c est la vitesse de la lumière. Le bleu est situé vers 470 nm (1 nanomètre = 10^{-9} m) et le rouge vers 600 nm. Ainsi, l'atome d'hydrogène, composé d'un électron tournant autour d'un proton, émet une série de raies. En 1885, Balmer en répertoria 35 dans le visible et le proche ultraviolet avec des λ croissants entre 364 nm et 656 nm. On chercha une loi empirique reproduisant cette distribution. En 1900, Rydberg réussit à la paramétrer précisément grâce à la formule : $1/\lambda = R_H (1/2^2 - 1/n^2)$, où R_H est la constante de Rydberg et n un entier supérieur à 2.

Dès que les techniques spectroscopiques permirent de regarder au-delà du domaine visible, Lyman découvrit une nouvelle série dans le domaine ultraviolet et Paschen découvrit la sienne dans le domaine infrarouge. Toutes les séries répondent à la formule empirique : $1/\lambda = R_H (1/n_1^2 - 1/n_2^2)$, où n_1 et n_2 sont deux nombres entiers positifs tels que $n_1 < n_2$.

Une numérologie se révélait dont la raison semblait tout à fait mystérieuse. Il fallait bien chercher à l'élucider.

4. Et la charge ?

La matière possède une structure corpusculaire, elle se construit à partir de briques élémentaires d'abord identifiées comme atomes puis comme constituants de ces atomes. Ceci fut directement vérifié par la découverte de l'électron dans les tubes cathodiques par J.J. Thomson en 1898. L'électron sera la première particule élémentaire mise à jour. On sait aujourd'hui que sa taille est inférieure à 10^{-18} m, quand la taille de l'atome vaut 10^{-10} m.

La matière est donc corpusculaire, la lumière émise par les éléments révèle également des propriétés discontinues. Existe-t-il d'autres grandeurs quantifiées dans la Nature ? Certainement. En premier lieu, la charge électrique, et cela remonte aux origines de la physique microscopique. Robert Millikan a laissé son nom attaché à ce résultat.

Il est relativement facile d'électriser la matière. Depuis Coulomb, on sait qu'une charge électrique subit une force quand elle traverse un champ électrique. Millikan imagina une expérience ingénieuse. Il observa de petites gouttes électrisées chutant sous l'effet de leur masse dans le champ de gravitation, et subissant en parallèle la force électrique grâce à l'ajout d'un champ électrique qui freine leur mouvement. Cela permet de mesurer finement la charge portée. Millikan trouva que les gouttes portent toutes une charge multiple d'une charge élémentaire qu'il mesure égale à $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$. C'est la charge portée par l'électron, conventionnellement choisie négative.

Or la matière est électriquement neutre dans son état normal. Il faut donc imaginer l'existence de charges positives compensatrices. Elles sont portées par le noyau de l'atome, qui concentre la quasi-totalité de la masse, ce que démontre Ernest Rutherford en 1911. La notion d'atome, longtemps considérée comme une fructueuse hypothèse de travail, devenait réalité. Mais l'atome n'est pas indivisible, comme le suggère son nom venant du grec, il présente une structure planétaire, et le noyau lui-même se compose de protons, portant la charge positive précisément opposée à celle de l'électron, auxquels il faut ajouter des neutrons sans charge électrique.

5. Qu'annonce Planck, le prophète ?

Cette discussion de la mécanique quantique nous invite à faire un petit tour d'horizon des grandes figures qui illustrèrent le développement de la théorie. Et le premier personnage qui apparaît

sur scène est Max Planck. C'est lui qui trancha le nœud gordien des spectres d'émission lumineuse en proposant une hypothèse difficile à accepter le cœur léger.

Dans un article publié en 1900, le physicien réussit à rendre compte des raies observées en supposant que la lumière est émise sous forme granulaire. Il analyse la distribution spectrale du corps noir. C'est par définition un corps qui absorbe la totalité du rayonnement qu'il reçoit, en pratique un four chauffé observé par un trou. Pour modéliser la distribution mesurée, Planck renonce à la loi classique en imaginant que l'énergie s'y distribue sous forme de quanta répondant à la formule $E = h\nu$, où E est l'énergie, ν la fréquence et h est un paramètre *ad hoc* qui rappelle l'allemand *hilfe* (« au secours ») car la solution lui semblait désespérée. La proposition ne reposait pas sur un profond raisonnement, c'était un pari osé, et pourtant elle s'avéra riche de multiples conséquences.

h est un paramètre très petit. Cette constante, qui a les dimensions d'une action, c'est-à-dire le produit d'une énergie par un temps, est logiquement appelée constante de Planck et vaut $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s = $4,14 \cdot 10^{-21}$ MeV.s. Ici, l'énergie est mesurée en eV et ses multiples, 1 eV étant l'énergie acquise par un électron subissant une différence de potentiel de 1 V. C'est donc seulement pour des processus microscopiques qu'on notera le caractère granulaire des échanges. À notre échelle, les effets quantiques seront complètement lissés, et sauf dans des circonstances très particulières, ils resteront cachés.

Lors de sa publication, l'hypothèse de Planck parut inacceptable, la quasi-unanimité des physiciens se refusant à y voir autre chose qu'un artifice mathématique. Mais l'hypothèse devait être rapidement confirmée par toute une série de faits expérimentaux mettant en évidence l'existence de discontinuités dans l'évolution des systèmes physiques à l'échelle microscopique.

La mécanique quantique précède de cinq ans l'autre révolution qui nourrira toute la physique du XX^e siècle : la relativité. L'énergie est quantifiée, elle emplit l'espace sous forme granulaire, à l'image

de la matière formée de constituants élémentaires. $E = h\nu$ est une loi certainement aussi bouleversante que la fameuse formule relativiste $E = mc^2$, bien qu'elle soit beaucoup moins populaire.

6. Comment l'effet photoélectrique apparaît-il ?

Albert Einstein, qui plus tard restera très sceptique envers la mécanique quantique, amène en 1905 un soutien décisif. La lumière quand elle interagit avec la matière le fait sous forme granulaire, elle se comporte comme un jet de grains lumineux élémentaires appelés photons.

Au cours de l'histoire, la nature de la lumière donna lieu à une longue controverse. Newton penchait vers l'idée d'une structure en grains, mais Fresnel soutenait l'idée d'onde, ce que suggéraient les expériences d'interférence et de diffraction. La nature ondulatoire de la lumière semblait définitivement victorieuse après les travaux de Maxwell qui, en 1855, unifie de manière très convaincante l'électricité et le magnétisme par un jeu de quatre relations mêlant des champs électrique et magnétique. Il assimile l'onde lumineuse à une onde électromagnétique, dont les composantes vibrent en phase, ce qui amène à un remarquable résultat : la lumière se propage à la vitesse c reliée à deux constantes de la Nature caractérisant le vide, la permittivité ϵ_0 et la perméabilité μ_0 . L'équation, qui s'écrit $\epsilon_0\mu_0c^2 = 1$, fixe c à la remarquable vitesse de 300 000 km/s, et c'est bien ce que mesure l'expérience. Il était donc puéril de contester un tel résultat, et la vision ondulatoire fut universellement adoptée.

Notons que le désir d'unifier les divers champs de la science a toujours été une des préoccupations les plus fécondes des physiciens. Newton unifie deux aspects de la gravitation, Maxwell unifie l'électricité et le magnétisme. Nous rencontrerons d'autres exemples poursuivant le même but.

Mais à la fin du XIX^e siècle, un fait nouveau intervient : on étudie l'interaction de la lumière avec la matière. Si un rayon lumineux frappe une surface métallique, des électrons peuvent en être extraits. C'est l'effet photoélectrique observé quand on irradie sous vide un métal alcalin avec de la lumière ultraviolette. Mais cette émission offrait un casse-tête. L'intensité du courant électrique recueilli est bien proportionnelle à l'intensité du rayonnement. En revanche, la vitesse des électrons libérés ne dépend pas de l'intensité mais seulement de la fréquence utilisée. C'est Einstein qui interprète ce phénomène. Il ose prétendre que la lumière se comporte comme un flux de photons et l'émission photoélectrique témoigne d'une collision directe entre un photon et un électron lié au métal. L'explication d'Einstein est simple : la lumière se présente sous forme de corpuscules d'énergie $h\nu$. Lorsque l'un d'eux rencontre un électron attaché au métal, il transmet toute son énergie $h\nu$ à l'électron. En quittant le métal, l'électron doit fournir un travail égal à son énergie de liaison, le reste apparaît sous forme d'énergie cinétique. La lumière bleue donne lieu à l'extraction, parce que son énergie est suffisante, le rouge demeurera stérile. Cela est en accord avec la formule de Planck $E = h\nu$ puisque l'énergie du rayonnement bleu avoisine 3 eV, tandis que la lumière rouge n'atteint que 1 eV.

Einstein recevra le prix Nobel en 1921 pour cette contribution majeure. Il est paradoxal de constater que le comité suédois l'ait honoré pour un progrès soutenant la mécanique quantique, lui qui plus tard sera très critique, et non pour la relativité auquel son nom est décidément attaché. Il faut dire que la relativité restera « politiquement » plus controversée pendant longtemps.

7. Qu'ajoute Compton ?

Arthur Compton apporte une nouvelle pierre à l'hypothèse du photon au détriment de la théorie ondulatoire. L'effet qui prend son nom est observé dans la diffusion de rayons X qui éjectent des