

Prologue

Qu'est-ce que la physique quantique ?

Qu'est-ce que la physique ? Dans son acception ancienne, c'est la « science des causes naturelles », définition trop générale de nos jours mais qui mériterait sans doute d'être reconsidérée. La physique se restreint en effet à l'étude des propriétés générales de la matière non vivante et des phénomènes mesurables qui en résultent. Remarquons cependant que la biochimie et la biologie moléculaire sont devenues *de facto* des secteurs de la physique.

De la physique classique à la physique quantique

Jusqu'à la fin du 19^e siècle, la physique était compartimentée en disciplines assez bien délimitées, telles que : chimie, mécanique, optique, thermodynamique, cristallographie, électricité, magnétisme, hydraulique, etc. L'unification de domaines séparés commença avec l'électricité et le magnétisme, aboutissant à l'électromagnétisme qui engloba à son tour l'optique. De son côté la mécanique statistique des gaz prenait pied dans la thermodynamique.

Les physiciens étudiaient tous les phénomènes issus de la matière mais celle-ci restait une énigme en elle-même. Il n'existait que peu de connaissances sur la structure intime de la matière et les diverses disciplines scientifiques n'avaient pas de base commune. Depuis plus de deux millénaires, les hommes essayaient bien d'imaginer l'existence d'atomes, entités ultimes et insécables, qui formeraient par leur assemblage tous les corps, mais il ne s'agissait que de spéculations sans réelles justifications expérimentales.

Les cristallographes et les chimistes furent les premiers, au cours du 19^e siècle, à essayer d'apporter des preuves scientifiques de l'existence des atomes. Mais ce ne fut qu'après la première décennie du 20^e siècle que les expériences de diffraction des rayons X par les cristaux convinquirent définitivement les physiciens de l'existence d'une structure atomique de la matière. La quantification de la matière commença à s'imposer et la physique quantique fit ses premiers pas en inventant les premiers modèles de l'atome.

La quantification de l'énergie débuta dès 1900 avec l'hypothèse de Max Planck d'échanges d'énergie avec la matière par très petites quantités, ou *quanta*. Elle se poursuivit en 1905 avec Albert Einstein qui, reprenant l'hypothèse de Newton de « grains » de lumière, aboutit ainsi à une modélisation de l'effet photo-électrique. La spectroscopie allait ensuite permettre de concevoir une émission d'énergie par les atomes sous forme discrète. La quantification de l'énergie devint la compagne indispensable de l'atome dans son mariage au sein de la matière.

Les fondements de la physique deviennent quantiques

L'exploration intime de la matière s'est poursuivie au cours du 20^e siècle. Les atomes se révélèrent moins insécables que leur nom ne le laissait prévoir. La découverte expérimentale des constituants de l'atome : électrons, protons et neutrons, permit de concevoir un modèle atomique qui allait servir de base à bon nombre de disciplines de la physique classique.

La mécanique quantique, dont Louis de Broglie fut l'initiateur, allait permettre de modéliser l'atome de façon particulièrement efficace. L'équation de Schrödinger devint le cheval de bataille qu'enfourchèrent tous les atomistes. Les chimistes suivirent pour mieux étripier leurs molécules.

Peu à peu, nombre de disciplines de la physique classique bénéficièrent des retombées de la physique atomique. La chimie quantique fit son apparition, puis l'optique quantique, la thermodynamique quantique, l'électronique quantique, etc.

Les fondements de toute la physique devinrent quantiques ce qui ne saurait étonner puisque la connaissance des constituants de la matière — qu'il s'agisse des gaz, des liquides ou des solides — permet d'en déduire les phénomènes étudiés par les physiciens. Finalement, la physique quantique regroupe tous les domaines classiques en une physique fondamentale.

L'exploration de la matière ne se limite pas aux atomes car, au cours du 20^e siècle, une descente vers des structures de plus en plus fines fut mise en œuvre grâce aux accélérateurs de particules. La physique nucléaire devint une nouvelle spécialité quantique. Les particules que l'on croyait « élémentaires » tel le proton, par exemple, furent disséquées grâce au scalpel des hautes énergies. Les quarks sont devenus les particules élémentaires de la matière en attendant, peut-être de nouvelles entités encore plus déliées. La théorie quantique des champs, s'inscrivant dans la suite de la mécanique quantique traditionnelle et de l'électrodynamique quantique, devient la théorie ultime de la physique quantique.

Pourquoi s'intéresser aux origines de la physique quantique ?

Dans cet ouvrage, nous nous limitons aux fondements de la physique quantique sans aborder les développements considérables qu'ils ont engendrés dans tous les domaines de la physique. De plus, nous ne donnons qu'un aperçu des origines de ces fondements. À qui s'adresse donc un tel ouvrage ?

D'abord à tous ceux qui sont susceptibles de s'intéresser aux sciences en tant que culture générale. Avant d'être réduite en équations, la physique a pour base des idées et des hypothèses qui ensuite sont passées à la moulinette des mathématiques. Or il est facile de comprendre les idées de base qui ont servies aux auteurs des origines de telle partie de la physique quantique.

Nous avons donc donné les idées principales qui incitèrent les fondateurs de la physique quantique à parvenir à telle équation fondamentale. Mais la façon

d'obtenir ces équations, lorsqu'elles furent créées pour la première fois, est souvent bien plus simple que la manière sophistiquée dont les suivants les présentèrent, certes parfois en les améliorant, mais en les rendant plus difficiles à comprendre.

Ainsi, par exemple, nous n'avons pas utilisé la représentation des vecteurs d'état introduite par Dirac. C'est un formalisme élégant qui, pour le praticien, est efficace mais qui n'apporte rien de plus au néophyte en rendant complètement opaque la signification physique de cette écriture.

Ainsi que le font remarquer L. Landau et E. Lifchitz dans leur fameux cours de mécanique quantique [Lan1] traduit dans le monde entier :

Force est de remarquer que dans maints cours de mécanique quantique l'exposé s'est notablement compliqué en comparaison des ouvrages originaux. Bien qu'une telle complication soit habituellement motivée par la généralité et la rigueur, un examen attentif montre que l'une et l'autre sont en réalité souvent illusoire à tel point qu'une bonne partie de ces « théorèmes » rigoureux est fausse.

Une telle complication nous paraissant absolument injustifiée, nous avons, au contraire, tenu à la simplicité et souvent sommes revenus aux ouvrages d'origine.

Aussi bien dans leur cours de *Mécanique quantique* que dans celui de *Théorie quantique relativiste*, ces auteurs utilisent seulement la notation classique des fonctions d'onde sous forme d'intégrales.

Dans le présent ouvrage nous avons fait de même. Finalement, le lecteur n'a d'ailleurs besoin que de connaître les notions de dérivée, d'intégrale et de matrice pour comprendre les origines des textes fondamentaux de la mécanique quantique, car nous n'avons pas développé les calculs qui figurent dans ces textes, ne donnant que les résultats.

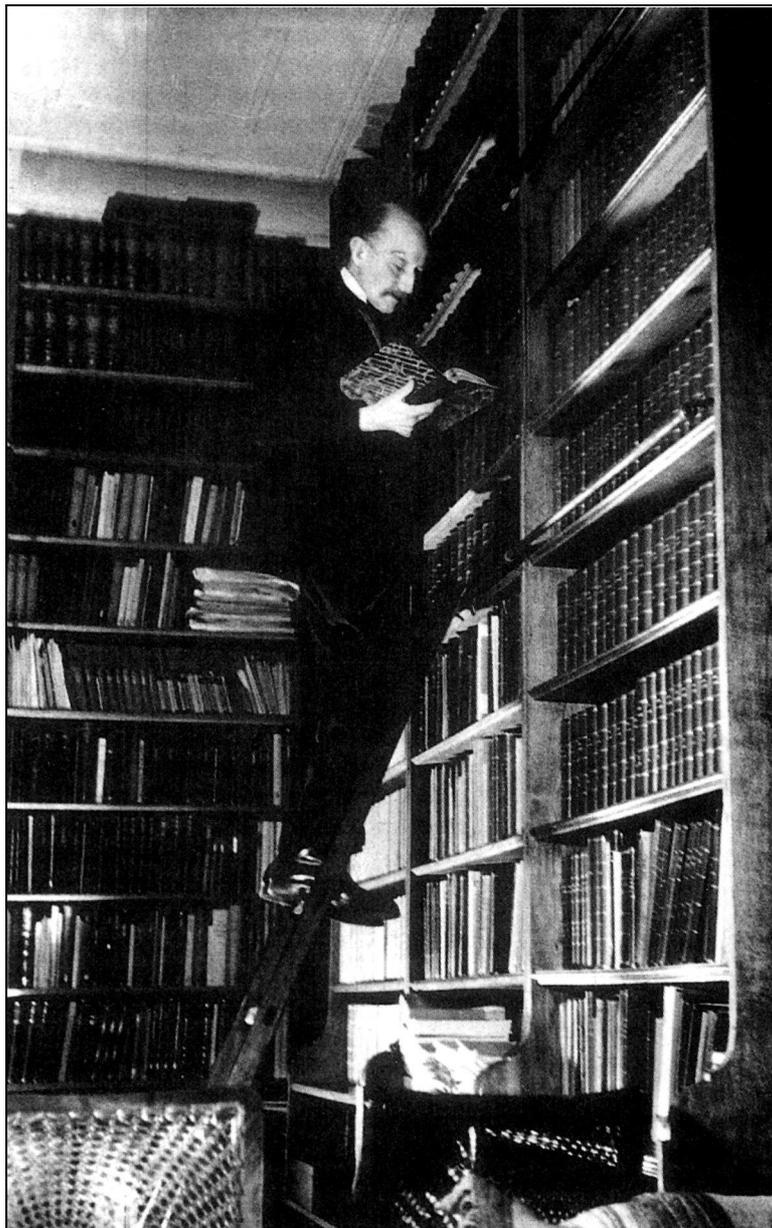
Il semble cependant indispensable de donner un aperçu de la méthode mathématique utilisée par les auteurs des textes d'origine pour mettre en forme leurs idées physiques. Une physique sans mathématique n'existe pas car la mesure des phénomènes est finalement le seul test expérimental qui valide toute théorie. Les ouvrages « grand public » qui dissertent sur la physique quantique sans donner une seule formule ne sont, à notre avis, qu'un jeu d'ombres dont les véritables entités sont invisibles.

Ce livre sera également très utile aux étudiants qui débutent en physique quantique. Souvent les enseignants ne développent pas suffisamment, faute de temps dans les programmes, les idées qui ont été à la base de la mécanique quantique. Si, de plus, leur enseignement utilise un formalisme trop abstrait, en travaillant sur des exemples décrits sous forme de schémas non liés à une réalité expérimentale, les étudiants sont rapidement rebutés par cette description de la physique quantique.

L'historicité de toute science est éducative en elle-même. Un peu, très peu, d'histoire des sciences est parfois enseigné dans les universités. Or cette histoire, en décrivant les détours et les difficultés de la recherche, permet de montrer que la connaissance a toujours été une conquête difficile dans l'opacité de la réalité.

Première partie

Quantification de la matière et du rayonnement



Max Planck (1858-1947), dans sa bibliothèque, en 1942
Initiateur de la physique quantique

Max PLANCK (1858-1947)

Physicien – Initiateur de la physique quantique

C'est l'étude théorique du rayonnement du *corps noir* qui a fait de Max Planck l'initiateur de la physique quantique. On réalise pratiquement un corps noir à l'aide d'une cavité presque complètement fermée dont les parois sont isothermes. En perçant dans cette cavité un petit orifice, celui-ci émet un rayonnement dit du corps noir.

C'est le 19 octobre 1900 que Planck lit devant la société de physique de Berlin son mémoire, *Sur une amélioration de la formule spectrale de Wien*. Dans son texte, il pose comme hypothèse une formule fondamentale de toute la physique quantique, celle reliant un élément d'énergie E d'un rayonnement à sa fréquence ν par la relation :

$$E = h\nu$$

Le coefficient de proportionnalité h , appelé *constante de Planck*, est une grandeur devenue l'une des constantes universelles de la matière. Planck déduit de cette hypothèse la célèbre formule donnant la répartition de l'intensité du rayonnement du corps noir en fonction de ses différentes fréquences. Dans son *Autobiographie scientifique*, Max Planck décrit ce moment historique [Bou1] :

[...] je proposai [la formule] à l'examen de la Société de Physique de Berlin, dans la séance du 19 octobre 1900, et j'en demandai la vérification expérimentale. Dès le lendemain matin, je recevais la visite de mon collègue Rubens. Il venait me raconter qu'après la fin de la séance, il avait confronté ma formule, au cours de la nuit même, avec les résultats de ses mesures expérimentales et trouvé une concordance satisfaisante en tous points.

De manière générale, remarquons que cette confrontation d'une formule théorique avec les résultats expérimentaux est essentielle. Toute théorie physique qui ne peut pas être vérifiée par des mesures expérimentales ne sera considérée par la communauté scientifique que comme une hypothèse susceptible d'être remise en question.

Si le sommet de la carrière scientifique de Planck réside dans la découverte de la fameuse relation $E = h\nu$, il participa également au développement de bien d'autres domaines. C'est en effet Planck qui, le premier, démontra rigoureusement la célèbre formule $E = mc^2$, formule qui avait seulement été reprise par Einstein en effectuant un faux raisonnement qui s'avéra être une tautologie [Hla2]. Planck s'intéressa l'un des premiers à la relativité restreinte et aboutit à nombre de résultats dans le développement de cette théorie [Pai1]. Planck fut également le premier à appliquer la relativité à la théorie quantique. Il en déduisit que la fameuse constante h est un invariant relativiste.

Le prix Nobel de physique 1918 fut attribué à Planck « en reconnaissance des services qu'il a rendus au développement de la physique par la découverte des quanta d'énergie ».

Chapitre 1

De l'existence des atomes

La science peut être considérée comme aussi ancienne que l'humanité. Elle ne débute pas avec la philosophie grecque ou l'astronomie chinoise mais dès la Préhistoire. L'existence de techniques élaborées avant toute invention de l'écriture met déjà en évidence les prémices de la science. Une continuité des idées a toujours eu lieu à travers les siècles, chaque génération bénéficiant des découvertes et des spéculations de leurs prédécesseurs. Il a dû en être de même au cours des millénaires de la Préhistoire. De plus, l'histoire des sciences devrait débiter avec l'étude des techniques utilisées par certains animaux puisque nous ne sommes que les suivants d'une longue évolution.

En réduisant un matériau friable en particules de plus en plus fines jusqu'à en faire une poudre impalpable, un homme de Cro-Magnon ne s'est-il pas demandé s'il était possible de rendre ces particules encore plus petites ? De là à imaginer une limite ultime de division de la matière, il faut sans doute patienter de nombreux millénaires.

Traditionnellement, l'hypothèse de particules ultimes, insécables, est attribuée à quelques philosophes grecs en quête d'une théorie des fondements de la matière, il y a presque vingt-cinq siècles, c'est-à-dire seulement 500 ans avant Jésus-Christ. Or les sciences orientales sont bien plus anciennes. De la Chine au Moyen-Orient, en passant par les Indes, des observations astronomiques nous sont parvenues qui remontent à plus de 3000 ans avant J.-C. Une science de l'astronomie commençait à se développer. Les mathématiques de la Chine anciennes sont encore en partie à découvrir. L'idée d'une constitution de la matière à partir de particules ultimes a pu voir le jour bien antérieurement aux hypothétiques *atomes* grecs.

Quoi qu'il en soit, le terme qui subsiste dans notre vocabulaire est celui d'atome pour désigner une particule de matière impossible à scinder, *atomos* signifiant en grec indivisible. Cependant, au cours du 20^e siècle, les expériences montrèrent que les atomes sont en fait constitués de nombreuses particules, donc sont divisibles, mais la terminologie a été conservée.



Démocrite (-460, -370)

Philosophe grec, il développa la théorie des atomes de Leucippe, son maître et ami. Une tradition raconte qu'il se serait crevé les yeux pour mieux méditer, ainsi que le montre le buste ci-contre. C'est peut-être un symbole pour dire qu'il fermait les yeux à toutes les distractions du dehors afin de concentrer toute son activité sur la pensée.

Selon Démocrite, les véritables principes des choses sont le vide et les atomes, particules insécables, éternelles, dont les propriétés sont la grandeur, la forme et le mouvement. Tous les corps particuliers naissent par l'union des atomes et meurent par leur séparation, mais non la matière elle-même.

Allons donc voir chez les Grecs

Démocrite, élève studieux de Leucippe, quatre siècle avant J.-C., admit qu'il devait exister d'ultimes particules de matière qui ne pouvaient être scindées en plusieurs constituants.

Les atomes sont-ils crochus ?

Mais à partir de cette simple hypothèse, comment concevoir la multiplicité des choses réelles ainsi que simultanément la possibilité de changement ? Pour cela, il fallait séparer l'espace de la matière, alors qu'une identification implicite existait dans les systèmes philosophiques antérieurs, et admettre en même temps le « vide » dans lequel les atomes auraient la possibilité de se déplacer.

Selon Leucippe et Démocrite, les atomes sont compacts et doués d'un mouvement continu et éternel, non concerté et aléatoire, déterminé par leurs chocs mutuels. En se heurtant, les atomes peuvent soit rebondir « dans la direction où le hasard les jette », soit « s'agglutiner selon la congruence des formes, des grandeurs, des positions et des arrangements et demeurer ensemble pour achever de la sorte la génération des composés ». Ainsi, selon ces philosophes, pouvait se concevoir la diversité de la réalité physique.

Pour que les atomes restent assemblés entre eux, il faut imaginer des systèmes d'accrochages. Selon Démocrite, les atomes sont en forme de hameçons, recourbés et crochus. Leur association peut alors produire un nombre infini d'objets très divers même si les formes des atomes sont en nombre supposé limité. Utilisant certains propos d'Aristote, qui s'opposa à la théorie atomique, on peut remarquer qu'« après tout, ce sont les lettres du même alphabet qui composent tragédie et comédie ».

La nature obéit à des lois

Il ne faut pas croire que l'idée d'entités élémentaires, d'atomes, fit l'unanimité parmi les philosophes grecs, loin de là, et cette querelle se perpétua jusqu'à la fin du 19^e siècle. Les arguments pour justifier l'existence réelle des atomes étaient en effet d'ordre purement spéculatif.



Albert le Grand (vers 1200-1280)

Biologiste, philosophe et théologien, Albertus Magnus a marqué le monde intellectuel du Moyen Âge.

Ses travaux sur la pensée grecque la rendirent accessible aux érudits de son époque.

Il laissa à la théologie le privilège des questions religieuses, mais il fut le premier penseur occidental influent qui n'acceptait pas la même autorité pour toutes les choses terrestres. Il était persuadé que la connaissance de la nature ne pouvait s'acquérir que par une observation disciplinée. L'Église catholique fera de lui, en 1941, le Saint patron des chercheurs en sciences naturelles.

Ainsi, par exemple, reprenant les idées de Démocrite dans son ouvrage *De natura rerum*, Lucrèce, au premier siècle avant J.-C., avance l'argument suivant pour prouver l'existence des atomes :

Si l'on n'admet pas dans la nature un dernier terme de petitesse, les corps les plus petits seront composés d'une infinité de parties, puisque chaque moitié aura toujours une moitié et cela à l'infini. Quelle différence y aurait-il alors entre l'univers même et le plus petit corps ? On n'en pourrait point établir ; car si infiniment étendu qu'on suppose l'univers, les corps les plus petits seraient eux aussi composés d'une infinité de parties. La droite raison se révolte contre cette conséquence et n'admet pas que l'esprit y adhère ; aussi faut-il t'avouer vaincu et reconnaître qu'il existe des particules irréductibles à toute division et qui vont jusqu'au dernier degré de la petitesse ; et puisqu'elles existent, tu dois reconnaître aussi qu'elles sont solides et éternelles.

Un tel argument ne pouvait évidemment convaincre que ceux qui voulaient bien croire à l'existence des atomes et les théories antiatomistes feront florès tout au long de l'Histoire.

L'Église récupère les atomes cachés longtemps sous le tapis

Comme presque tous les philosophes de l'Antiquité, les atomistes bâtirent à partir de leurs principes toute une cosmogonie, ce qui ne faisait pas l'affaire des religions en place. Il devint évident que, selon la théorie atomique, les Dieux n'intervenaient pas dans la marche du monde, régi par des lois physiques. Cependant, par prudence, les anciens philosophes admettaient l'existence des Dieux mais en fait ils les laissaient à la porte de leurs réflexions et du monde.

Le rejet de l'atomisme grecque

C'était la naissance d'une philosophie de la nature qui ne veut reconnaître que ce que notre raison conçoit et approuve, désireuse d'explorer l'essentiel et l'universel. C'était aussi la croyance scientifique que la nature, sous sa multiplicité et sa complexité apparente, cache un ordre qu'il est possible d'explicitier en termes d'éléments simples et de leurs interactions sans faire place à des interventions surnaturelles.

Au cours des siècles suivants, la théorie atomique ne pouvait donc pas laisser indifférents les théologiens et les autorités religieuses en place. Aussi