

Chapitre 1

Introduction

1.1 La mécanique quantique

La mécanique quantique est actuellement considérée comme la théorie la plus fondamentale de la physique. Elle est apparue progressivement au début du vingtième siècle suite à un certain nombre d'échecs de la physique classique. Entre la découverte en 1900 par Max Planck (1858-1947) de la constante qui porte son nom, suivie par son introduction de la notion de quantum d'énergie, et la construction par Erwin Schrödinger (1887-1961) de son équation fondamentale, vingt-cinq années se sont écoulées.

Il a fallu encore attendre plusieurs années pour qu'une interprétation physique efficace d'une solution de cette équation, appelée *fonction d'onde*, soit proposée. Cette interprétation probabiliste, dite de Copenhague, a été proposée par Niels Bohr (1885-1962), Max Born (1882-1970) et les physiciens de leur groupe à Copenhague. Après ces débuts parfois hésitants, la *mécanique quantique* est devenue rapidement une théorie d'une étonnante efficacité pour expliquer tous les phénomènes aux échelles microscopiques. Elle décrit notamment avec précision les propriétés des atomes, des molécules et des noyaux atomiques.

Avant la forme actuelle de la mécanique quantique, une autre description, appelée *ancienne théorie des quanta*, a obtenu certains succès comme une description précise du spectre de l'atome d'hydrogène. Mais elle a échoué à expliquer les propriétés des atomes à plusieurs électrons et a donc été abandonnée.

Pour la mécanique quantique, nous employons le mot *théorie*. Il est utile ici de préciser cette notion qui a un sens différent en sciences et dans le langage courant. Dans le langage courant, le mot "théorie" décrit une tentative d'explication d'événements. Une théorie peut avoir un caractère spéculatif. En langage scientifique, au contraire, une théorie est une structure mathématique qui explique précisément l'ensemble des faits expérimentaux connus d'un certain domaine. La mécanique classique avec ses extensions relativistes peut être qualifiée de théorie pour les propriétés des objets macroscopiques. Mais cette théorie n'englobe pas les échelles microscopiques. L'ancêtre de la mécanique quantique, l'ancienne théorie des quanta, a perdu

son statut de théorie quand il est apparu qu'elle ne s'appliquait qu'à une petite partie des phénomènes microscopiques. A l'avenir, certains faits expérimentaux pourraient ne pas être expliqués par la mécanique quantique et exigeraient la découverte d'une meilleure théorie. Même dans ce cas, la théorie quantique resterait une excellente approximation de cette éventuelle généralisation, mais avec un domaine de validité plus limité.

L'objet de cet ouvrage est de présenter la mécanique quantique sous sa forme la plus simple, ou la moins compliquée, basée uniquement sur la notion de fonction d'onde, que l'on appelle la *mécanique quantique ondulatoire*. Elle présente l'avantage de minimiser les difficultés mathématiques. Les principales notions mathématiques nécessaires sont celles de dérivation et d'intégration. Quelques notions plus délicates, comme celle d'opérateur, sont néanmoins requises mais sont vues de façon aussi intuitive que possible. Nous faisons le choix de ne pas définir l'élégant mais abstrait formalisme de Dirac pour décrire les états quantiques. Cependant, nous utilisons la notation de Dirac pour y familiariser le lecteur avant qu'il n'aborde des ouvrages plus avancés.

Avant d'entamer l'étude de la mécanique quantique, il convient de la replacer dans le cadre général de la physique contemporaine et de présenter les concepts sur lesquels elle s'appuie, c'est-à-dire les notions de particule et d'interaction ainsi que les lois de conservation qu'elles vérifient. Nous expliquons également la différence entre les approches non relativiste et relativiste de la mécanique quantique. Un plan commenté de l'ouvrage est présenté à la fin de ce chapitre.

1.2 Fondements microscopiques de la physique

1.2.1 Principes fondamentaux

Le but de la physique est de fournir une description de tout phénomène observable à partir d'un nombre restreint de principes fondamentaux. Ce but ambitieux a motivé les activités des physiciens depuis plusieurs siècles et est à la base des recherches actuelles. De cette façon, les lois de la physique sont censées s'appliquer non seulement à des expériences de laboratoire, mais aussi à tous les faits observables incluant ceux régissant la structure et l'évolution de l'univers ou des êtres vivants. Le domaine d'application de la physique couvre donc toutes les échelles de dimension de la nature et les mêmes lois devraient pouvoir expliquer à la fois les phénomènes microscopiques ayant lieu à l'échelle des particules élémentaires ou des atomes, les phénomènes mésoscopiques qui se situent entre les domaines microscopique et macroscopique et les phénomènes macroscopiques à l'échelle humaine ou même à celle de l'univers. Les lois de la physique doivent donc servir de base aux autres disciplines scientifiques (chimie, biologie, ...) et techniques.

La *physique quantique* porte d'abord sur l'étude des lois et propriétés du monde microscopique qui couvre plusieurs échelles de grandeur. Elle décrit d'une part les particules élémentaires constituant la matière et d'autre part des objets composites comme les protons, les neutrons, les noyaux atomiques, les atomes ou les molécules. La mécanique quantique ne permet cependant pas d'effectuer les calculs nécessaires

lorsque le nombre de particules augmente trop fortement. Il faut alors utiliser la *physique statistique* qui tente d'expliquer les lois décrivant les phénomènes macroscopiques à partir de notions définies à l'échelle microscopique. Les différentes branches de la physique (mécanique, électromagnétisme, optique, physique des matériaux, ...) ne sont donc pas indépendantes et résultent des lois de la physique microscopique après passage à l'échelle macroscopique. La physique à l'échelle macroscopique est dénommée de façon générale *physique classique*. Ce terme désigne traditionnellement l'ensemble des théories décrivant des phénomènes où les effets relativistes et quantiques sont négligeables. On y inclut en particulier la mécanique newtonienne et la théorie de l'électromagnétisme. Dans son vaste champ d'application, la physique classique permet de décrire un grand nombre de phénomènes, et ceci beaucoup plus simplement que si on tentait de les décrire avec les physiques quantique et statistique, théories qui lui ont succédé et dont elle représente une limite.

Notre interprétation actuelle de la nature au niveau microscopique résulte de quelques principes fondamentaux que l'on peut résumer de la façon suivante.

1. L'univers et tous les objets qu'il contient sont constitués d'entités élémentaires appelées *particules*. Il existe un petit nombre de types de particule distincts et toutes les particules d'un même type sont identiques. Chaque type de particule est de plus caractérisé par des propriétés bien définies telles que la masse et la charge électrique.
2. Tous les phénomènes observés dans la nature sont le résultat d'*interactions* entre des particules, c'est-à-dire d'influences mutuelles de ces particules les unes sur les autres. Il existe un petit nombre de types d'interaction distincts et chaque type d'interaction est caractérisé par des propriétés bien définies telles que la portée de l'interaction ou son intensité.
3. Au cours des interactions, certaines grandeurs mesurables sont *conservées*, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas modifiées par l'interaction entre les particules. On dit que ces grandeurs vérifient des *lois de conservation* qui découlent en général de *principes de symétrie*.

Les principes fondamentaux de la physique sont mis en application au moyen d'un petit nombre d'hypothèses appelées *postulats*. Ces postulats permettent d'établir une description mathématique des phénomènes observables et sont indémontrables par définition. Pour que des postulats soient acceptés en tant que tels, il faut que tous les faits expérimentaux connus puissent être expliqués à partir de ceux-ci par un processus de *déduction*, c'est-à-dire par un raisonnement rigoureux basé sur les règles de la logique. Il n'existe donc pas d'explication absolue des observations expérimentales mais seulement des explications relatives aux postulats. Les postulats acceptés à une certaine époque ne sont pas définitifs, et peuvent être remplacés par d'autres lorsque certains faits ne sont pas expliqués par les postulats existants. La recherche de nouveaux postulats se fait par *induction*, c'est-à-dire par une recherche intuitive de généralisations de notions existantes et d'unifications de descriptions partielles ou apparemment incompatibles. La physique quantique est apparue suite à la remise en cause des postulats de la physique classique qui ne parvenaient pas à expliquer un certain nombre d'expériences (chapitre 2). Dans les sections qui suivent, nous allons

considérer successivement les bases de la physique microscopique : les quatre interactions fondamentales, les particules stables et les principales lois de conservation.

1.2.2 Les quatre interactions fondamentales

À l'échelle humaine, il existe une grande variété d'interactions ou forces¹. On peut par exemple observer des chocs entre des corps plus ou moins solides, des frottements entre divers matériaux, des échanges de matière ou de chaleur entre des liquides, des gaz ou des solides, des effets lumineux et sonores, des effets mécaniques dus à l'attraction par la terre, par la lune, par le soleil, . . .

La physique microscopique est basée sur quatre interactions fondamentales : les interactions forte, électromagnétique, faible et gravitationnelle. Tous les phénomènes macroscopiques, pourtant si divers, peuvent être expliqués à partir de deux de ces interactions : les interactions électromagnétique et gravitationnelle. Leurs caractéristiques ont été déduites de l'étude de leurs effets macroscopiques, tandis que l'existence des deux autres interactions est apparue progressivement suite à la découverte de la radioactivité.

Interaction	Attractive ou répulsive	Portée	Ordre de grandeur
Forte	Attractive ou répulsive	10^{-15} m	1
Electromagnétique	Attractive ou répulsive	infinie	10^{-2}
Faible	Attractive ou répulsive	10^{-18} m	10^{-5}
Gravitationnelle	Attractive	infinie	10^{-36}

Tableau 1.1 – Les quatre interactions fondamentales et leurs principales propriétés.

La physique tente de représenter ces interactions à partir d'un nombre de concepts aussi petit que possible. Les quatre interactions et leurs principales propriétés sont résumées dans le tableau 1.1 où les interactions sont classées par ordre d'intensités décroissantes, l'intensité de l'interaction nucléaire forte étant choisie comme unité de référence. Pour chacune des interactions, nous précisons son caractère attractif et/ou répulsif, l'ordre de grandeur de sa portée et l'ordre de grandeur relatif de son intensité. La *portée* d'une interaction est une longueur qui mesure son rayon d'action. Asymptotiquement, une interaction dont la portée a est finie voit son intensité décroître exponentiellement d'un facteur e sur une distance a . Le potentiel correspondant $V(r)$ possède une forme asymptotique

$$V(r) \underset{r \rightarrow \infty}{\sim} \frac{e^{-r/a}}{r}. \quad (1.2.1)$$

1. Le mot "interaction" signifie l'action mutuelle d'un objet sur un autre. Le mot "force" a un sens précis en physique classique mais recouvre le même concept. Il est souvent utilisé comme un synonyme d'interaction.

La force associée à ce potentiel décroît également comme $e^{-r/a}/r$. Comme $e^{-r/a}$ tend vers 1 quand a tend vers l'infini, les potentiels de portée infinie décroissent en $1/r$ et les forces correspondantes ont un comportement en $1/r^2$. Les potentiels (1.2.1) avec $a \neq 0$ sont dits "à courte portée".

L'interaction gravitationnelle est la première interaction qui a été découverte, en dépit de sa faible intensité. Elle a pu être identifiée plus facilement que les autres car sa portée est infinie et elle est *toujours* attractive. Ses effets ne sont jamais masqués à l'échelle macroscopique. Son intensité est proportionnelle au produit des masses des particules qui interagissent. Son extrême faiblesse et l'ordre de grandeur des masses des particules élémentaires font qu'elle ne joue pas de rôle en physique microscopique, en tout cas dans le cadre des énergies propres à toute expérience actuellement concevable.

L'interaction électromagnétique est aussi observable à l'échelle macroscopique en raison de sa portée infinie. Cependant, elle peut être soit attractive, soit répulsive. L'intensité de l'interaction coulombienne est proportionnelle au produit des charges électriques des particules qui interagissent. Le cadre mathématique associé nécessite donc l'introduction d'un signe pour les charges des particules. Comme la matière à l'échelle macroscopique est en général neutre ou peu chargée, les effets électromagnétiques à longue portée sont souvent masqués. Par contre, aux échelles microscopiques, cette interaction joue un rôle fondamental pour expliquer la structure de la matière. Ses propriétés sont ainsi essentielles en physique quantique.

Les deux autres interactions n'ont pas d'effet direct à l'échelle macroscopique à cause de leur très faible portée. Elles ont d'abord été découvertes sous leur forme régissant les propriétés des noyaux avant d'être généralisées à des constituants plus élémentaires. L'interaction forte joue un rôle primordial pour la structure de la matière puisqu'elle assure sa stabilité et sa diversité. En effet, elle permet de lier les noyaux atomiques composés de neutrons et de protons en dépit de la répulsion coulombienne entre les protons et de créer ainsi des systèmes compacts chargés positivement autour desquels les électrons peuvent s'organiser en structures atomiques et moléculaires.

L'interaction faible n'a aucun effet sur la structure de la matière microscopique ou macroscopique à cause de sa petitesse devant l'interaction forte. Sa faiblesse est de plus amplifiée par sa très courte portée. Par contre, elle rend possible des processus de désintégration, comme la désintégration β , au cours desquels une particule se transforme en une autre avec émission d'autres particules plus légères. Ces désintégrations sont à la base de la diversité des éléments dans la nature. Ces derniers sont principalement formés dans les étoiles à partir d'une succession de captures de protons ou de neutrons et de désintégrations β . La faiblesse de cette interaction a pour conséquence que ces processus de désintégration sont souvent très lents. La lenteur de l'évolution du soleil, régie principalement par l'interaction faible, a ainsi rendu possible l'apparition et l'évolution de la vie sur notre planète.

Comme les physiciens recherchent une description de la nature aussi simple que possible, de nombreuses tentatives sont faites pour unifier les quatre interactions et les décrire par un cadre mathématique unique associé à une interaction plus générale les englobant toutes les quatre. Des progrès importants ont été réalisés dans cette direction depuis la fin des années soixante, mais leur description dépasse le cadre de

cet ouvrage. De plus, même si une interaction unifiée était découverte, elle aurait selon les circonstances des propriétés très proches de l'une ou l'autre des quatre interactions mentionnées ci-dessus. Il est donc tout à fait justifié d'étudier ces quatre interactions comme si elles étaient distinctes.

1.2.3 Les particules stables

Type	Particule	Symbole	Charge	Masse	Durée de vie moyenne
Lepton	électron	e ou e^-	$-e$	9.11×10^{-31} kg	stable
	neutrino	ν_e	0	$< 10^{-36}$ kg	stable
Baryon	proton	p	$+e$	1.67×10^{-27} kg	$> 10^{29}$ a
	neutron	n	0	1.67×10^{-27} kg	880 s
Boson de jauge	photon	γ	0	0	stable

Tableau 1.2 – Particules stables et leurs principales propriétés.

La matière qui nous entoure est constituée de particules stables. Ce ne sont pas les seules particules découvertes mais tout autre type de particule a une durée de vie moyenne de l'ordre de la microseconde ou beaucoup moins. Dans cet ouvrage, nous nous limitons à l'étude des particules stables ou plutôt des systèmes composés de particules stables. Nous allons ainsi considérer le proton p , le neutron n , l'électron e^- et, dans une moindre mesure, le neutrino électronique ν_e et le photon γ . Les particules stables et leurs principales propriétés, la charge, la masse et la durée de vie moyenne, sont présentées dans le tableau 1.2. Dans ce tableau, l'unité de charge est la charge du proton,

$$e \approx 1.602177 \times 10^{-19} \text{ C.} \quad (1.2.2)$$

La durée de vie d'une particule est le temps écoulé entre son apparition dans un processus physique et sa désintégration spontanée en d'autres particules. La durée de vie d'une particule bien précise n'est pas connue a priori et peut différer de la durée de vie d'une autre particule du même type. La *durée de vie moyenne* est la moyenne statistique des durées de vie des particules d'un certain type. C'est une grandeur précise pour chaque type de particule.

A chaque particule correspond une *antiparticule* de même masse, de même durée de vie moyenne et de charge opposée. L'antiparticule de l'électron e^- est le positron e^+ . Celles du neutrino électronique ν_e , du proton p et du neutron n sont respectivement l'antineutrino électronique $\bar{\nu}_e$, l'antiproton \bar{p} et l'antineutron \bar{n} . Le photon γ est sa propre antiparticule, ce qui est possible mais pas obligatoire quand la charge de la particule est nulle.

Les particules présentées dans le tableau 1.2 sont classées en trois catégories : les leptons, les baryons et les bosons de jauge.

Les *leptons* sont des particules qui ne sont pas affectées par l'interaction forte. Certains sont de plus légers, comme indiqué par l'étymologie du mot lepton (“leptos” voulant dire “mince” en grec). Les deux leptons étudiés dans le tableau, l'électron et le neutrino électronique, sont stables. L'électron est considéré comme une *particule élémentaire*, sans structure interne et de rayon nul. Bien qu'à la fois l'électron et son antiparticule le positron soient stables, ces deux particules peuvent s'annihiler mutuellement pour donner d'autres particules. Le neutrino et l'antineutrino sont des leptons non chargés, également élémentaires, uniquement sensibles à l'interaction faible. Ils interagissent très faiblement avec toutes les autres particules et ne provoquent quasiment pas d'effet observable. Le soleil émet ainsi de grandes quantités de neutrinos qui nous traversent à chaque seconde sans interagir avec les particules qui nous constituent. Bien qu'il ait été observé expérimentalement que les neutrinos sont massifs, une mesure précise de leur masse reste l'un des grands enjeux actuels de la physique fondamentale (exercice 1c).

Les *baryons* sont des particules affectées par l'interaction forte et sont en général plus lourds que les leptons, comme suggéré étymologiquement (“baryos” voulant dire “lourd” en grec). Les deux baryons étudiés dans le tableau 1.2 sont des particules très semblables, aux propriétés similaires mis à part leur charge. Le proton est stable ou tout au moins métastable, avec une durée de vie moyenne au moins un million de milliards de fois plus longue que l'âge de l'univers. Il est donc d'un point de vue pratique considéré comme stable. Bien que la durée de vie moyenne d'un neutron libre soit proche du quart d'heure, le neutron est stable dans de nombreux noyaux atomiques du fait de la présence d'autres *nucléons*, c'est-à-dire d'autres protons et neutrons. Nous l'avons par conséquent inclus dans le tableau 1.2 des particules stables. En fait, le proton et le neutron ne sont pas des particules élémentaires comme l'électron ou le neutrino, mais sont des objets dynamiques composés de *quarks* et de *gluons*, particules qui ne peuvent pas être étudiées isolément (section 1.3.2).

La dernière catégorie de particules introduites dans le tableau 1.2 consiste en les *bosons de jauge* qui véhiculent les différentes interactions. Rappelons que dans le formalisme de la relativité restreinte, aucune particule ne peut aller plus vite que la vitesse de la lumière dans le vide

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.2.3)$$

(section 14.2), de sorte que la propagation des forces se fait à vitesse finie inférieure ou égale à c . Le *photon* est responsable de la médiation des interactions électromagnétiques. Sa masse et sa charge électrique sont toutes deux nulles. Par conséquent, le photon est le médiateur neutre d'une interaction à laquelle il n'est pas sensible. Le photon est la particule la plus abondante de l'univers et, en raison de sa masse nulle, est une particule relativiste qui se propage dans le vide à la vitesse c de la lumière dont il est le constituant. Le photon ne peut pas être décrit dans le cadre du formalisme non relativiste développé dans cet ouvrage, mais certaines de ses propriétés sont discutées au chapitre 2. Selon les phénomènes étudiés, le photon peut porter un nom différent : photon gamma, photon X, photon ultraviolet, photon visible, photon radio, ... Il ne s'agit pas de particules différentes, mais de photons d'énergies différentes.

1.2.4 Lois de conservation

Lors d'interactions entre deux ou plusieurs particules, on observe que les valeurs de certaines grandeurs ne sont pas modifiées. On dit alors que ces grandeurs sont *conservées* au cours du temps. De façon plus générale, on peut définir pour chaque grandeur conservée une *loi de conservation* par laquelle on suppose que cette grandeur est *toujours* conservée lors de ces interactions. C'est l'accumulation d'un très grand nombre d'observations expérimentales qui conduit à accepter la validité d'une loi de conservation. Les lois de conservation peuvent être dérivées théoriquement à partir d'un théorème de la mathématicienne Emmy Noether (1882-1935) si l'on admet que les lois de la nature respectent certains *principes de symétrie*. Cette notion de symétrie est à la base de tous les progrès récents en physique fondamentale et de nombreux progrès dans d'autres branches de la physique.

Parmi les lois de conservation connues, nous allons en présenter trois. Il s'agit des conservations de l'énergie, de l'impulsion et de la charge électrique.

La *conservation de l'énergie* est certainement la loi la mieux connue et celle qui a le plus de conséquences pratiques. Cette loi observée dans tous les phénomènes microscopiques reste valable à l'échelle macroscopique. Ainsi, l'énergie totale d'un système isolé de son environnement ne peut changer. Au niveau microscopique, l'énergie existe sous la forme d'énergie de masse, cinétique et potentielle. Au niveau macroscopique, on distingue des formes d'énergie plus variées mais qui s'expliquent toutes à partir de ces mêmes formes d'énergie microscopique. L'énergie peut se transformer d'une forme en une autre de façon à ce que sa valeur totale ne change pas. Comme l'énergie de masse peut être transformée, la masse n'est pas une grandeur conservée.

La *conservation de l'impulsion* est inséparable de la conservation de l'énergie. Dans le cadre de la relativité restreinte, ces deux grandeurs sont d'ailleurs les composantes d'une même et unique quantité, le quadrivecteur énergie-impulsion (section 14.2.2). En l'absence de champs extérieurs, l'impulsion équivaut à la quantité de mouvement (section 12.3), c'est-à-dire au produit de la masse et de la vitesse du système. En vertu de la loi de conservation, l'impulsion totale d'un système isolé de particules ne peut changer au cours des interactions entre ces particules. Cette loi de conservation se vérifie aussi à l'échelle macroscopique, même si elle est souvent beaucoup plus difficile à mettre en évidence.

La *conservation de la charge* est vérifiée dans toutes les expériences connues et constitue une propriété fondamentale de la nature. Il existe des processus où de l'énergie cinétique est convertie en énergie de masse par l'apparition d'une particule et de l'antiparticule associée, comme par exemple une paire électron-positron. Comme la charge ne peut varier lors de l'apparition d'une telle paire, cela implique qu'une particule et son antiparticule ont *exactement* la même charge en valeur absolue.

Un processus qui ne respecte pas une loi de conservation ne devrait jamais être observé et est dit *interdit*. Des expériences tentant de mettre en évidence un processus interdit permettent donc de tester la validité des différentes lois de conservation avec une certaine précision.