

CHAPITRE I

NOTIONS FONDAMENTALES

1 Introduction

L'idée selon laquelle la matière n'est pas continue, mais constituée de petites parties identiques, est très ancienne puisque dans la Grèce antique Démocrite décrivait les atomes comme des objets insécables séparés par du vide. Il existait différents types — peu nombreux — d'atomes, qui suffisaient à expliquer l'ensemble de l'Univers. Les progrès de la chimie au XIX^e siècle conduisirent au concept d'élément et établirent la théorie atomique sur des bases plus scientifiques : il y aurait autant de sortes d'atomes que d'éléments distincts.

Cependant la découverte expérimentale de l'électron en 1896 par J.J. Thomson montre qu'il existe un objet ayant une masse environ mille fois plus petite que l'atome le plus léger, l'hydrogène. On peut situer le début de la physique des particules à cette date (on parlait alors de physique corpusculaire). Jusqu'à preuve du contraire, en 2015, l'électron, première particule découverte, reste une particule élémentaire, c'est-à-dire un objet qui ne peut pas être divisé. Les atomes sont toujours spécifiques à chaque élément. Ils ont conservé leur nom mais ne sont plus insécables, puisqu'ils contiennent — entre autres — des électrons.

Bien que le noyau de l'atome ait été mis en évidence dès 1911, l'évolution de cette physique fut lente jusqu'aux années 1930. Elle fut en fait dominée par le développement spectaculaire de la physique atomique durant cette période. C'est la découverte du neutron en 1932 qui finalement déclencha son développement rapide. À partir du moment où la composition du noyau en protons et neutrons fut établie, on sépara la physique nucléaire de la physique des particules. La première se propose d'étudier la structure du noyau, sa stabilité ou son instabilité, c'est-à-dire les possibilités de désintégration spontanée ou provoquée, ainsi que ses réactions avec d'autres noyaux. De nombreuses applications de cette discipline ont bouleversé le XX^e siècle (production d'énergie, datation radioactive, médecine nucléaire, etc.).

La physique des particules s'intéresse plus directement aux objets réellement insécables, les « particules élémentaires ». Jusqu'en 1937, les

seules particules élémentaires connues étaient l'électron, le proton et le neutron, ainsi que le photon, particule de lumière introduite par Einstein en 1905. Il faut y ajouter le *neutrino* prédit en 1931 par Pauli mais dont la réalité expérimentale ne fut démontrée qu'en 1956. Or, en 1937, Anderson et Neddermeyer découvrent le *muon*, une particule produite naturellement dans les rayons cosmiques. Ce nouveau venu que personne n'avait prévu est le premier d'une très longue suite de nouvelles particules, ce qui enclenche un développement fulgurant de la discipline, à la fois sur le plan théorique et sur le plan expérimental. Par une sorte de revirement (et de simplification), Gell-Man et Zweig montrent en 1964 que le proton, le neutron et beaucoup d'autres particules nouvellement découvertes, doivent être considérés comme composés de plusieurs *quarks*. On voit que la propriété d'éléментарité est toujours relative à une époque donnée, pouvant être contredite par une découverte nouvelle. Par contre, on peut toujours raisonner sur une particule « non élémentaire » si l'on ne s'intéresse pas à la structure interne d'un proton ou même d'un atome, par exemple. Le Modèle standard, élaboré à partir des années 1980, comprend 17 particules élémentaires, dont 6 quarks et le *boson de Higgs* découvert en 2012.

La physique nucléaire et la physique des particules ont un point commun — outre le fait qu'elles se donnent pour but de connaître la matière à l'échelle la plus intime — qui les distingue des autres domaines de la physique et de la chimie. En effet la connaissance des objets n'est pas suffisante, il faut aussi comprendre les propriétés de leurs interactions mutuelles. L'étude des interactions nucléaires est l'autre sujet principal de la physique nucléaire et de la physique des particules. La gamme d'énergie mise en jeu par ces interactions est au moins un million de fois plus élevée que celle de l'interaction électromagnétique responsable de la liaison chimique. Les appareils de mesure et les dispositifs expérimentaux sont adaptés en conséquence. Il y a cependant un point de divergence des deux disciplines. En effet, dans la deuxième partie du XX^e siècle, et jusqu'à aujourd'hui, la physique des particules a eu besoin, contrairement à la physique nucléaire, d'appareils produisant des énergies de plus en plus élevées. La physique des particules est d'ailleurs souvent dénommée « physique des hautes énergies ».

Bien que rien ne soit vraiment infini (au sens mathématique du terme) dans les sciences expérimentales, on y parle souvent de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. Ces deux domaines se sont, curieusement, progressivement rapprochés. En effet il est apparu très rapidement qu'une question centrale en astronomie, l'origine de l'énergie du Soleil et des étoiles, ne trouvait sa réponse que grâce à la physique nucléaire. Par la suite,

le problème de la formation des éléments chimiques dans l'Univers a reçu lui aussi une solution. Par un mouvement inverse, certaines observations astrophysiques complétèrent de façon cruciale nos connaissances en physique des particules : la première antiparticule, le *positron* ou antiélectron, fut découverte dans les rayons cosmiques, bientôt suivie du muon et de particules plus lourdes. Aujourd'hui, la physique des neutrinos est un domaine qui rassemble des astrophysiciens et des physiciens des particules. Quant à la cosmologie, elle a besoin, en particulier pour la compréhension des premiers instants de l'Univers (le Big Bang), d'une théorie complète des interactions qui fait encore l'objet de recherches actives.

Ce cours n'étant qu'une introduction, on se limitera à décrire quelques phénomènes et problèmes importants, à préciser les idées fondamentales et les nouveaux concepts de ces disciplines. On étudiera dans une première partie les noyaux, les réactions nucléaires ainsi que les phénomènes de désintégration et de radioactivité alpha, bêta et gamma. Un chapitre sera dédié à quelques applications. Dans la seconde partie on étudiera les particules et leurs deux interactions spécifiques, faible et forte.

Ce chapitre rappelle quelques concepts de base de mécanique quantique et de relativité, à savoir la « dualité onde-corpuscule », les « relations d'indétermination » et le principe d'équivalence « énergie-masse ». Ils peuvent, si besoin est, permettre d'avoir à l'esprit une idée intuitive d'un phénomène ou de calculer son ordre de grandeur. L'équation d'onde non relativiste de Schrödinger et les équations d'onde relativistes de Klein-Gordon et de Dirac seront ensuite introduites. Enfin, l'interprétation des solutions de l'équation d'onde relativiste de Dirac nous conduira à aborder le concept d'antiparticule.

2 Mécanique quantique

La physique quantique débute en 1900, lorsque Planck introduit sa constante h , homogène à une action (énergie multipliée par un temps). On utilise souvent la constante de Planck réduite : $\hbar = h / 2\pi$.

Nous savons que la mise en évidence expérimentale du photon comme porteur des grains de lumière a mis en valeur l'interprétation corpusculaire mais on n'a pas trouvé de raison fondamentale pour rejeter le point de vue ondulatoire de la lumière (existence des phénomènes d'interférence et de diffraction). C'est de là qu'est née l'idée de dualité onde-corpuscule qui a

été ensuite généralisée à la matière : de même que le photon, les particules constituant la matière, doivent avoir un aspect ondulatoire, c'est-à-dire qu'elles peuvent être caractérisées par une onde associée. La dualité onde corpuscule doit être une caractéristique fondamentale et universelle des particules et non pas une propriété exclusive du photon.

Considérons par exemple un électron animé d'un mouvement rectiligne et uniforme. Selon le modèle corpusculaire, il est caractérisé par l'impulsion \mathbf{p} et l'énergie E . D'après le modèle ondulatoire, on peut le représenter par une *fonction d'onde* plane :

$$\psi = C \exp[i (\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad [1]$$

où C est une constante, \mathbf{k} et \mathbf{r} sont respectivement le vecteur d'onde et le vecteur position, ω est la pulsation et t est le temps. La mécanique quantique nécessite toujours l'utilisation de nombres complexes, d'où la présence du symbole imaginaire i .

Le vecteur d'onde est relié à l'impulsion de la particule par la formule :

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$$

On a donc la relation donnant la longueur d'onde, due à De Broglie (1927) :

$$\lambda = h / p \quad [2]$$

La pulsation est reliée à l'énergie E par la relation :

$$E = \hbar \omega$$

Si l'on introduit la fréquence ν , on obtient la relation d'Einstein (1905) :

$$E = h \nu$$

La prédiction de De Broglie fut confirmée de façon éclatante par les expériences de Davisson et Germer (1927). Un faisceau d'électrons est diffracté par les atomes d'un cristal exactement comme les rayons X de même longueur d'onde.

En mécanique quantique il est impossible de mesurer simultanément, avec une précision parfaite, une coordonnée d'espace et une impulsion associée à une particule. Les relations de Heisenberg (1927) relient l'indétermination minimale de mesure de chaque composante spatiale à la coordonnée correspondante de l'impulsion :

$$\Delta x \Delta p_x \approx \hbar ; \quad \Delta y \Delta p_y \approx \hbar ; \quad \Delta z \Delta p_z \approx \hbar \quad [3]$$

Il existe également une relation entre le temps et l'énergie :

$$\Delta E \Delta t \approx \hbar \quad [4]$$

Cependant cette dernière ne possède pas la même signification car le temps est un paramètre cinématique universel et non une observable spécifique à chaque particule, du moins en mécanique quantique non relativiste.

Une conséquence de cette quatrième relation est qu'il est impossible d'attribuer une énergie bien définie à un phénomène ayant un temps caractéristique fini.

3 Relativité

Les formules dynamiques de la physique classique doivent être remplacées par les formules relativistes lorsque les vitesses considérées v ne sont plus négligeables par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 300\,000\text{ km s}^{-1}$) ou bien lorsque les énergies ne sont plus négligeables par rapport à l'énergie de masse $E = mc^2$.

$\mathbf{p} = m \mathbf{v}$ devient $\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$, où :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = \frac{1}{2} m c^2 \text{ est remplacé par : } E = \gamma m c^2 \quad [5]$$

La formule célèbre d'Einstein $E = m c^2$ est le cas particulier de la formule précédente, lorsque la particule est au repos, correspondant à $\gamma = 1$. Il existe une nouvelle relation entre l'impulsion et l'énergie :

$$E = \frac{p^2}{2m} \text{ devient : } E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4 \quad [6]$$

En relativité — contrairement à la mécanique classique — il existe donc des particules de masse nulle, qui possèdent une impulsion et une énergie non nulles. Elles se déplacent toujours à la vitesse de la lumière. C'est le cas en particulier du photon.

Les quantités (\mathbf{p}, E) et (\mathbf{r}, t) forment deux quadrivecteurs de l'espace temps. En conséquence, il existe des scalaires invariants lorsque l'on passe d'un repère galiléen à un autre :

$$E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 \quad ; \quad c^2 t^2 - \mathbf{r}^2$$

Il ne s'agit pas de longueurs comme dans un espace euclidien ordinaire, puisque ces invariants peuvent être négatifs. Ces derniers sont utiles dans la résolution de nombreux problèmes.

La formule classique de l'énergie ne contient pas le terme $m c^2$, et la masse d'un système est toujours égale à la somme des masses de ses composants (loi de Lavoisier). Au contraire, en mécanique relativiste il est possible de créer ou détruire des particules, tout en respectant les lois de conservation de l'impulsion et de l'énergie.

4 Unités et constantes

Donnons la liste des constantes qui seront utilisées dans les différents problèmes :

- la vitesse de la lumière : $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$, qui est une bonne approximation de la valeur exacte $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ (cette valeur est *exacte*, car elle est considérée comme une constante de la nature depuis 1983, date à laquelle l'étalon de longueur est défini par rapport à l'étalon de temps) ;
- l'accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$;
- la constante de gravitation : $G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$;
- le nombre d'Avogadro : $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
- la permittivité du vide ϵ_0 et la constante de l'électrostatique : $\frac{1}{4} \pi \epsilon_0 = 9 \times 10^9 \text{ SI}$;
- la charge du proton (et l'opposée de la charge e de l'électron) : $q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

On en déduit des unités d'énergie et de masse adaptées au monde subatomique :

- l'électron-volt (eV) = $1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$, et ses multiples, keV, MeV, GeV, TeV ;
- la masse de l'électron est : $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$;
- la masse du proton est : $m_p = 1,672\,622 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938,272 \text{ MeV}/c^2 = 1836 m_e$;
- la masse du neutron est : $m_n = 939,565 \text{ MeV}/c^2$.

Il y a aussi des unités de longueur et d'aire (section efficace) adaptées au monde subatomique :

- 1 femtomètre (fm), anciennement appelé fermi : $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$;
- 1 barn = 10^{-28} m^2 .

Enfin la constante de Planck :

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4,136 \times 10^{-21} \text{ MeV s} ;$$

et la constante de Planck réduite :

$$\hbar = 1,0546 \times 10^{-34} \text{ J s} = 6,582 \times 10^{-22} \text{ MeV s}.$$

5 Ordres de grandeur

Les formules [2] [3] [4] de mécanique quantique et [5] [6] de relativité font intervenir trois quantités physiques importantes :

- l'énergie (ou l'impulsion ou la masse) ;

- la longueur ;
- le temps.

Dans un système d'unités simplifié, on peut poser :

$$\hbar = c = 1$$

d'où :

$$\begin{aligned} l &= (c) t \\ E &= m (c^2) \\ E &= p (c) \\ \lambda &= (h) / p \end{aligned}$$

Dans ce système, les énergies, impulsions, les masses et les inverses des longueurs et des temps ont la même dimension :

$$l = t = 1 / E = 1 / p = 1 / m$$

Pour explorer les détails fins de la matière, le premier instrument inventé fut le microscope optique, qui permet d'observer les détails de l'ordre du micromètre. Son pouvoir séparateur est limité par la diffraction de la lumière, liée à la nature ondulatoire du photon :

$$\Delta x = \lambda / \sin(\theta)$$

où θ est l'angle d'ouverture du microscope. Dans le domaine de la lumière visible λ est compris entre 0,4 et 0,7 μm . Pour arriver à de meilleures précisions, il faut utiliser un rayonnement électromagnétique de plus courte longueur d'onde, tel que les rayons X. On peut ainsi explorer des détails de l'ordre de 10^{-10} m, c'est-à-dire l'échelle d'un atome.

Pour aller plus loin, il est possible d'utiliser des électrons plutôt que des photons, car ces particules chargées sont produites facilement par un accélérateur. La longueur d'onde de l'électron se calcule par la relation de De Broglie. Par exemple, pour une accélération par une différence de potentiel de mille volts, l'énergie cinétique T donne l'impulsion par la formule non relativiste :

$$T = 1000 \text{ eV} = 10^{-3} \text{ MeV}$$

$$p = \sqrt{2mT}$$

$$m = 0,511 \text{ MeV}/c^2, \quad h = 4,136 \times 10^{-21} \text{ MeV s}$$

On trouve :

$$\lambda = 4,136 \times 10^{-21} \times 3 \times 10^8 / (2 \times 0,511 \times 10^{-3})^{1/2} = 3,90 \times 10^{-11} \text{ m}$$

On obtient ainsi une longueur compatible avec la dimension de l'atome.

Pour un accélérateur d'électron de 1 GeV, il est nécessaire d'utiliser la formule relativiste, mais celle-ci se simplifie car mc^2 est négligeable devant E : $E \approx pc$.

$$\lambda = 4,136 \times 10^{-21} \times 3 \times 10^8 / 10^3 = 1,24 \times 10^{-15} \text{ m}$$

On obtient une longueur comparable à la dimension du noyau (femtomètre).

L'observation des phénomènes se produisant à des dimensions de plus en plus petites nous oblige paradoxalement à utiliser des machines de dimension de plus en plus grande pour obtenir des énergies de plus en plus élevées.

Les différents ordres de grandeur de l'énergie permettent de caractériser différents domaines de physique :

- l'électronvolt (eV) est utilisé en physique atomique. L'énergie de liaison de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène est 13,6 eV. Quelques dizaines d'électronvolts suffisent à arracher les électrons des atomes (c'est le cas par exemple quand on frotte une allumette).

Des énergies de l'ordre du keV sont atteintes pour les niveaux profonds d'atomes lourds qui émettent des rayons X ;

- le mégaélectronvolt (MeV) est utilisé en physique nucléaire. L'énergie de liaison du couple neutron-proton qui constitue le noyau de deutérium (isotope lourd de l'hydrogène) est 2,22 MeV. La scission des noyaux nécessite cet ordre de grandeur d'énergie ;

- le gigaélectronvolt (GeV) est l'unité principale de la physique des particules. C'est l'ordre de grandeur des masses du proton et du neutron. À partir de quelques GeV il est possible de créer de nouvelles particules ;

- le téraélectronvolt (TeV) est atteint par les plus grands accélérateurs (Tevatron aux États-Unis, LHC au CERN). Les rayons cosmiques les plus énergiques dépassent largement cette valeur.

On peut estimer l'ordre de grandeur du temps caractéristique d'une évolution entre deux états dont la différence d'énergie est égale à ΔE par la relation [4]. Pour les interactions nucléaires, une variation ΔE de 1 MeV conduit à :

$$\Delta t \approx \hbar / \Delta E = 6,582 \times 10^{-22} \text{ s}$$

Pour les interactions électromagnétiques un million de fois moins énergiques $\Delta E = 1 \text{ eV}$, le temps caractéristique est de l'ordre de 10^{-16} seconde.

6 Équations d'onde

En mécanique quantique, à chaque grandeur physique on fait correspondre un opérateur. Ce principe de correspondance associe par exemple l'opérateur $i \hbar \partial/\partial t$ à l'énergie E et l'opérateur $-i \hbar \nabla$ à l'impulsion \mathbf{p} .

L'état d'une particule quelconque est décrit par une fonction d'onde $\psi = (\mathbf{r}, t)$, dont le cas particulier pour un mouvement rectiligne uniforme est