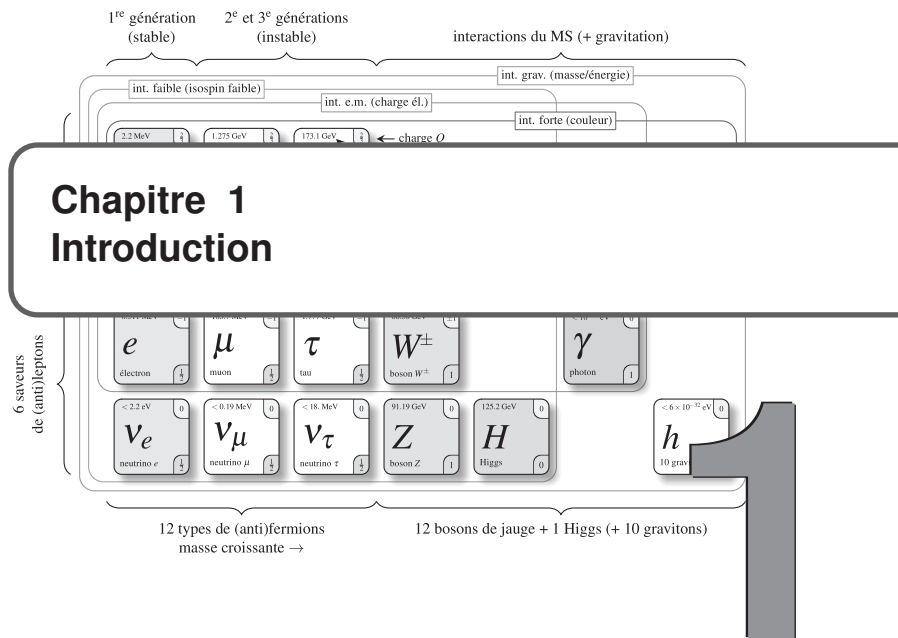


Luc Marleau

Licence

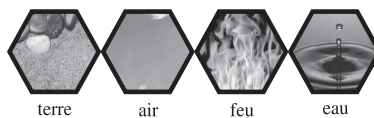
# Introduction à la physique des particules





**V**U l'immense diversité des formes que prend la matière à l'échelle humaine, il est tentant de penser qu'à plus petite échelle, elle existe sous une forme plus fondamentale, voire plus simple. À tort ou à raison, l'approche scientifique s'est laissée guider par ce concept en espérant qu'une fois les briques élémentaires connues, il serait possible de reconstruire l'édifice jusqu'à notre échelle et même au-delà. Dans les faits, une telle reconstruction nous échappe encore...

La première mention d'éléments fondamentaux vient des Grecs. On croyait alors que la Nature était composée de quatre éléments : l'air, le feu, l'eau et la terre.



**Figure 1.1.** Les quatre éléments fondamentaux de la Nature (selon les Grecs).

Ces éléments furent ultérieurement remplacés par une notion simplificatrice, celle d'une particule indivisible de matière, l'atome. On attribue souvent l'énoncé de cette idée à Démocrite (460 avant J.-C. à Abdera, Thrace en Grèce). Il faut toutefois mentionner que cette approche n'a pas toujours fait l'unanimité. En effet, un autre point de vue suggérait plutôt qu'un objet ne pouvait être décrit que par ses propriétés collectives et que toute tentative

## 1. Introduction

---

de le voir comme un ensemble de propriétés individuelles de ses constituants était vouée à l'échec. Pourtant, dans la recherche d'une structure microscopique fondamentale de la matière comme dans d'autres domaines, cette dernière approche se révéla plutôt être un obstacle au progrès scientifique. Nos théories modernes de la matière, quant à elles, font appel au besoin à deux approches : nous décrivons les phénomènes physiques à certaines échelles par des descriptions empiriques (ex. : modèle de la goutte en physique nucléaire) ou par des théories plus fondamentales (ex. : modèle standard en physique des particules). Les constructions empiriques révèlent souvent des symétries du système qui permettent d'accéder à des modèles mathématiques alors qu'il est aussi envisageable que les théories plus fondamentales d'aujourd'hui seront remplacées par des approches encore plus sophistiquées tout en continuant à jouer un rôle de modèle approximatif ou efficace (ex : physique newtonienne versus physique relativiste).

Le dernier siècle a vu notre compréhension de la Nature être complètement modifiée par l'avènement de concepts comme la mécanique quantique et la relativité, mais aussi par les progrès de la technologie qui nous ont permis d'accéder à des phénomènes jadis inconnus ou à des échelles inexplorées. C'est le cas de la physique subatomique où on a vu notamment émerger une version plus moderne de l'atome dans laquelle celui-ci est formé de constituants plus fondamentaux comme les électrons, protons et neutrons. Croyant cette fois avoir trouvé les plus petites particules de la Nature, nous avons qualifié ces constituants de « particules élémentaires ». Mais la Nature allait encore nous jouer un tour puisque certaines de ces soi-disant particules élémentaires révélèrent une sous-structure (ex. : protons formés de quarks et gluons).

Tout en réalisant que le concept peut changer avec nos capacités d'explorer la Nature, nous utilisons aujourd'hui le terme « particule élémentaire » (ou « particule fondamentale ») pour décrire une particule, qui selon l'état actuel de nos connaissances, ne possède aucune sous-structure.

### 1.1 Système d'unités naturelles et de Lorentz-Heaviside

#### 1.1.1 Unités naturelles

Le système d'unités SI (système international) est basé sur trois unités fondamentales et nécessite trois étalons de mesure :

$$\begin{aligned}[\text{longueur}]_{\text{SI}} &= 1 \text{ m} \\ [\text{temps}]_{\text{SI}} &= 1 \text{ s} \\ [\text{masse ou énergie}]_{\text{SI}} &= 1 \text{ kg ou } 1 \text{ J} .\end{aligned}$$

Ces unités sont bien adaptées à la vie de tous les jours, mais sont peu pratiques tant aux échelles microscopiques abordées en physique subatomique qu'aux échelles macroscopiques requises en astrophysique. Pour simplifier le langage (et malgré un souci d'uniformisation des systèmes d'unités), les physiciens se sont dotés au besoin de systèmes d'unités plus pratiques.

En physique des particules, les systèmes étudiés mettent en jeu des particules dont les vitesses sont relativistes et dont les propriétés quantiques ne peuvent être négligées. Par ailleurs, la Nature nous fournit deux constantes fondamentales qui sont particulièrement

## 1.1 Système d'unités naturelles et de Lorentz-Heaviside

pertinentes pour de tels systèmes : la vitesse de la lumière  $c$  et le quanta de moment cinétique  $\hbar$ , appelée la constante de Planck réduite. Rappelons que dans le système SI, ces constantes sont numériquement ou très grandes ou très petites,

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad (1.1)$$

$$\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J s} = 6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV s} \quad (1.2)$$

ce qui complique le calcul algébrique ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ , eV désignant l'électronvolt). Pour des systèmes quantiques relativistes, il est par contre plus naturel d'exprimer une vitesse comme une fraction de  $c$ , et un moment cinétique en unités de  $\hbar$  :

Vitesse	=	fraction de $c$
Spin	=	en unités de $\hbar$ .

Le système d'unités naturelles (SUN) propose de suivre cette convention et d'utiliser comme étalon de mesure

$$\begin{aligned} [\text{vitesse}]_{\text{SUN}} &= 1 c \\ [\text{moment cinétique}]_{\text{SUN}} &= 1 \hbar \\ [\text{énergie}]_{\text{SUN}} &= 1 \text{ eV} \end{aligned}$$

où, sur la dernière ligne, nous avons choisi d'utiliser l'électronvolt (eV) et ses dérivés (ex:  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ...) en tant qu'étalon de mesure pour l'énergie. Ce choix se rapproche plus des échelles d'énergie considérées en physique des particules et facilite les mesures expérimentales puisqu'un électron soumis à une différence de potentiel de 1 V acquiert une énergie de  $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Dans le système d'unités naturelles, on pose

$$\hbar = c = 1. \quad (1.3)$$

Alors, les masses de l'électron et du proton s'écrivent respectivement

$$m_e = 0.511 \text{ MeV} \quad \text{et} \quad m_p = 938.3 \text{ MeV} .$$

### Exercice 1.1



#### Le système d'unités naturelles (SUN)

Exprimez le mètre et la seconde en unités naturelles.

■ Solution : Par analyse dimensionnelle, il est facile de trouver la combinaison requise de  $\hbar$  et de  $c$  qui permet d'éliminer les unités indésirables.

Pour le mètre, il suffit de diviser par  $\hbar c$  (exprimé en unités mMeV dans le SI) :

$$\begin{aligned} \frac{1 \text{ m}}{\hbar c} &= \frac{1 \text{ m}}{(3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}) \cdot (6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV s})} \\ &= 5.1 \times 10^{12} \text{ MeV}^{-1} . \end{aligned}$$

## 1. Introduction

Pour la seconde, il suffit de diviser par  $\hbar$  (exprimée en unités MeV s dans le SI) :

$$\begin{aligned}\frac{1 \text{ s}}{\hbar} &= \frac{1 \text{ s}}{6.58 \times 10^{-22} \text{ MeV s}} \\ &= 1.52 \times 10^{21} \text{ MeV}^{-1}.\end{aligned}$$



Notons de ces exemples que les unités de longueur et de temps dans ce système s'expriment toutes deux en termes de l'inverse des unités d'énergie. De façon générale, une quantité dans les unités SI (système international) possède des dimensions

$$[E^p L^q T^r]_{\text{SI}}$$

où  $E$ ,  $L$  et  $T$  représentent les unités d'énergie (en Joules), longueur (en mètres) et temps (en secondes) respectivement et  $J^p m^q s^r$  sont les unités SI.

Dans le SUN, cette quantité aura des unités d'énergie à la puissance  $p - q - r$ , soit  $E^{p-q-r}$ , c'est-à-dire qu'elle s'exprime en  $J^{p-q-r}$  ou encore en  $\text{MeV}^{p-q-r}$ . Pour effectuer la conversion du SI au SUN, il suffit de remplacer le joule, le mètre et la seconde respectivement par les facteurs suivants

$$\begin{aligned}\text{Énergie : } & 1 \text{ J} \rightarrow 6.24 \times 10^{12} \text{ MeV} \\ \text{Longueur : } & 1 \text{ m} \rightarrow 5.1 \times 10^{12} \text{ MeV}^{-1} \\ \text{Temps : } & 1 \text{ s} \rightarrow 1.52 \times 10^{21} \text{ MeV}^{-1}\end{aligned}$$

Inversement, le passage du SUN au SI est tout aussi simple sauf pour une subtilité. Puisqu'énergie, longueur et temps s'expriment tous en unités d'énergie, il faut faire le décompte des unités d'énergie qui proviennent de l'énergie, de la longueur et du temps séparément avant d'effectuer la conversion :

$$\begin{aligned}\text{Énergie : } & 1 \text{ MeV} \rightarrow 1.602 \times 10^{-13} \text{ J} \\ \text{Longueur : } & 1 \text{ MeV}^{-1} \rightarrow 1.96 \times 10^{-13} \text{ m} \\ \text{Temps : } & 1 \text{ MeV}^{-1} \rightarrow 6.58 \times 10^{-22} \text{ s}\end{aligned}$$

### Remarque 1.1

#### **i** Les très utiles unités SUN :

Pour les systèmes quantiques relativistes, l'utilisation des unités SUN comporte deux avantages majeurs :

- Deux des étalons sont définis exactement ( $\hbar = c = 1$ ).
- Ce choix permet de faire disparaître ces constantes de toutes les équations et d'en simplifier la forme.



## 1.1 Système d'unités naturelles et de Lorentz-Heaviside

Par exemple, en relativité restreinte, la relation entre l'énergie  $E$ , la quantité de mouvement  $\mathbf{p}$  et la masse au repos  $m$  d'une particule s'écrit

$$\underbrace{E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4}_{\text{unités SI}} \quad \Longrightarrow \quad \underbrace{E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2}_{\text{unités SUN}} .$$

Manifestement, ces quantités s'expriment dans les mêmes unités SUN. De la même façon, l'équation de Schrödinger devient

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \right) \psi(x) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x) \quad \Longrightarrow \quad \left( -\frac{1}{2m} \nabla^2 \psi + V \right) \psi(x) = i \frac{\partial}{\partial t} \psi(x) .$$

Malgré les avantages certains des unités SUN pour des systèmes quantiques relativistes, il est souvent utile et plus intuitif d'exprimer des quantités en unités SI. Par exemple, lorsqu'on parle de la durée d'un phénomène, il est plus facile de se visualiser un intervalle de temps de  $10^{-21}$  s qu'un intervalle de  $1.52 \text{ MeV}^{-1}$ .

En conséquence, nous adopterons le système d'unités naturelles dans les chapitres qui suivent sans toutefois en faire un usage exclusif. Le passage au système SI au système SUN ou l'inverse ne sera pas toujours explicitement mentionné mais, dans la plupart des cas, il sera souvent évident compte tenu du contexte.

### 1.1.2 Unités de Lorentz-Heaviside

Dans les unités SI, la charge électrique est exprimée en Coulombs, une unité distincte qui s'ajoute aux unités « mécaniques » (masse ou énergie, longueur, temps), bien que la définition traditionnelle de l'ampère se réfère à certaines de ces autres unités. Dans les systèmes d'unités naturelles cependant, la charge électrique a des unités de

$$[e]_{\text{SUN}} = E^{1/2} L^{3/2} T^{-1} .$$

En choisissant un système dit « rationalisé » d'unités qui redéfinit les unités de charge, il est possible d'y absorber certaines constantes électromagnétiques et de faire l'économie de certains facteurs de  $4\pi$  dans la formulation des équations de Maxwell.

Par convention, en physique des particules, nous utilisons les unités de Lorentz-Heaviside où la charge élémentaire du proton  $e$  est définie par :

$$e = \sqrt{4\pi\alpha_{\text{em}}\hbar c} = \sqrt{4\pi\alpha_{\text{em}}} \quad \text{ou} \quad \alpha_{\text{em}} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{e^2}{4\pi} ,$$

où  $\hbar$  est la constante de Planck réduite,  $c$  est la vitesse de la lumière, et la quantité adimensionnelle

$$\alpha_{\text{em}} = \frac{1}{137.0360}$$

est la constante de structure fine (aussi appelée constante de couplage électromagnétique). Dans un système d'unités naturelles où  $c = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 1$ , les unités de Lorentz-Heaviside peuvent facilement être dérivées des unités SI en posant la permittivité  $\epsilon_0$  et la perméabilité  $\mu_0$  du vide telles que  $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$ .

## 1. Introduction

---

### 1.2 Relativité et formalisme quadri-dimensionnel

La similitude entre les notions de temps et d'espace nous suggère d'adopter un formalisme quadri-dimensionnel. Par exemple, le vecteur de position espace-temps  $x$  est représenté par ses composantes contravariantes  $x^\mu$  (indice supérieur)

$$x^\mu = (x^0, x^1, x^2, x^3) = (x^0, \mathbf{x}) = (t, \mathbf{x}) . \quad (1.4)$$

où  $\mu = 0$  désigne la composante temporelle et  $\mu = 1, 2, 3$ , les composantes spatiales. (Dans la littérature, on trouve aussi la notation où  $\mu$  prend les valeurs  $\mu = 1, 2, 3, 4$  avec  $\mu = 4$  qui désigne la composante temporelle.) Les caractères gras désignent un vecteur en trois dimensions (ex.:  $\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{F}, \dots$ ).

En général, dans un espace vectoriel à  $D$  dimensions, il est possible de choisir  $D$  vecteurs de base  $e_\mu$  et de représenter un vecteur  $A$  à partir de ses composantes (contravariantes)  $A^\mu$ , parallèles aux  $e_\mu$ . Alors le vecteur  $A$  s'écrit dans l'espace-temps à quatre dimensions ( $4D$  ou  $3 + 1D$ ) comme la combinaison linéaire

$$A = \sum_{\mu=0}^3 A^\mu e_\mu = A^\mu e_\mu . \quad (1.5)$$

La deuxième égalité utilise la convention d'Einstein qui omet le symbole de somme. Alors un indice grec répété est réputé être sommé sur toutes ses valeurs possibles même si le symbole de somme n'apparaît pas. C'est-à-dire, lorsque le même indice grec se retrouve en indice contravariant (indice supérieur) et en indice covariant. (Les composantes avec indice inférieur sont dites covariantes et sont définies plus bas.)

Le produit scalaire des quadri-vecteurs  $A$  et  $B$  prend la forme

$$A \cdot B \equiv A^\mu e_\mu \cdot B^\nu e_\nu = A^\mu B^\nu g_{\mu\nu} \quad (1.6)$$

où  $g_{\mu\nu} \equiv e_\mu \cdot e_\nu$  est appelé le tenseur métrique ou simplement la métrique. Il est commun, et plus simple de choisir une base où les vecteurs sont orthogonaux, c'est-à-dire  $g_{\mu\nu} = 0$  si  $\mu \neq \nu$  et donc

$$A \cdot B = A^\mu B^\mu e_\mu^2 . \quad (1.7)$$

Rappelons que pour deux événements quelconques séparés dans l'espace par  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  et dans le temps par  $\Delta t$ , nous pouvons définir une quantité invariante de Lorentz appelée l'« intervalle » entre ces événements comme

$$-(\Delta s)^2 = (\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2 . \quad (1.8)$$

Pour le cas des quadri-vecteurs d'espace-temps dans l'espace de Minkowski, la longueur généralisée d'un vecteur de position espace-temps  $x$  correspond à l'intervalle entre le point  $x$  et l'origine, c'est-à-dire

$$\begin{aligned} x \cdot x &= x^\mu x^\mu e_\mu^2 \\ &= t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = \tau^2 \end{aligned} \quad (1.9)$$

où, à la deuxième ligne,  $x$ ,  $y$  et  $z$  est la composante du quadri-vecteur le long de l'axe des  $x$ ,  $y$  et  $z$  respectivement. Ainsi la norme des vecteurs de base est

$$e_{\mu}^2 = \begin{cases} 1 & \text{si } \mu = 0 \\ -1 & \text{si } \mu = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (1.10)$$

et le tenseur métrique s'écrit

$$g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

pour l'espace de Minkowski.

### Notation 1.1

#### **i** L'intervalle

Certains ouvrages utilisent la définition

$$-\Delta s^2 = -(\Delta t)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 .$$

Cela correspond à la convention  $g^{\mu\nu} = \text{diag}(-1, +1, +1, +1)$  pour les éléments de la diagonale de  $g^{\mu\nu}$  par opposition à celle qui est principalement utilisée en physique des particules et que nous adoptons ici, soit  $g^{\mu\nu} = \text{diag}(+1, -1, -1, -1)$ . **i**

Les composantes covariantes  $A_{\mu}$  (indice inférieur) sont des projections orthogonales de  $A$  sur les vecteurs de base  $e_{\mu}$ . Par exemple,

$$e_{\mu} \cdot A \equiv A_{\mu} \quad (1.12)$$

ou autrement dit

$$A_{\mu} \equiv e_{\mu} \cdot A = e_{\mu} \cdot A^{\nu} e_{\nu} = g_{\mu\nu} A^{\nu} .$$

À noter, le tenseur métrique  $g_{\mu\nu}$  et son inverse  $g^{\mu\nu}$  coïncident, c'est-à-dire

$$g_{\mu\nu} = (g^{\mu\nu})^{-1} = g^{\mu\nu} \quad (1.13)$$

puisque

$$g^{\mu\nu} g_{\nu\lambda} = \delta_{\lambda}^{\mu} \quad \text{et} \quad g^{\mu\nu} g_{\mu\nu} = 4 . \quad (1.14)$$

où  $\delta_{\lambda}^{\mu}$  est le delta de Kronecker. Des composantes contravariantes, on peut alors obtenir les composantes covariantes

$$A^{\mu} = g^{\mu\nu} A_{\nu} . \quad (1.15)$$