



**Edition
2015**

Affiche des

**composants
élémentaires
de la matière**

Brochure pédagogique

afficheComposantsElementaires@in2p3.fr
<http://www.particuleselementaires.fr>

Composants élémentaires de la matière



Être humain
1m

Terre
10⁷m

Soleil
10⁹m

Galaxie
10²¹m

LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS	
					
ν_e neutrino électron	e^- électron	u haut / up	d^- bas / down	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible. champ de Higgs	
ν_μ neutrino muon	μ^- muon	c charm / char	s étrange / strange	Désintégrations radioactives β^- et β^+ de certains noyaux instables Électricité, magnétisme, et des molécules, chimie Cohésion des protons, des neutrons, énergie nucléaire Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies	
ν_τ neutrino tau	τ^- tau	t top	b bas / beauty / bottom	Bosons $Z, W^{\pm}$ Photon γ Gluons g Graviton (?)	
1 ^{re} famille Constituants de la matière usuelle		2 ^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille		3 ^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	
INTERACTIONS		FONDAMENTALES		Champ de Higgs	
10^{-17} m	10^{-16} m	10^{-15} m	10^{-14} m	10^{-13} m	10^{-12} m
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	γ
γ	γ	γ	γ	γ	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

10 ⁻²⁷ m	interaction faible
∞	interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	interaction forte
∞	Gravitation

Bosons Z, W [±]	Désintégrations radioactives β ⁻ et β ⁺ de certains noyaux instables
Photon γ	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, posateur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation maintient les gazs ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



ANTIMATIÈRE

A chaque particule correspond une antiparticule. Les caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton



Composants élémentaires de la matière

Vous avez devant vous la seconde édition de « l’Affiche des composants élémentaires de la matière », créée en 2005 à l’occasion de l’Année Mondiale de la Physique. Elle a été mise à jour en 2014 pour inclure notamment le nouveau boson de Brout-Englert-Higgs¹, découvert en 2012 auprès du grand collisionneur LHC du CERN (le plus grand laboratoire de physique des particules du monde, situé près de Genève à la frontière franco-suisse), quarante-huit ans après la publication des premiers travaux théoriques prédisant son existence.

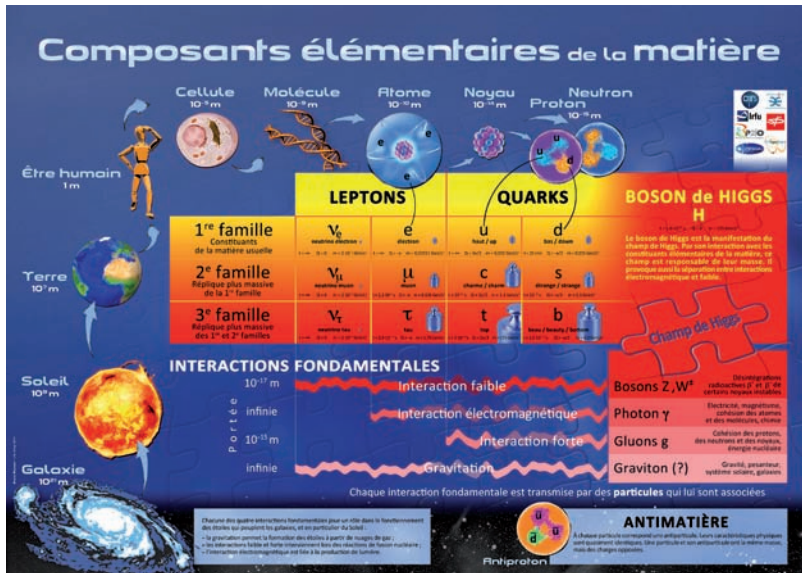
Comme en 2005, l’affiche version 2014 a été élaborée par un groupe de travail pluridisciplinaire, rassemblant des chercheurs (du CNRS, du CEA et des universités), des professeurs de physique-chimie, des spécialistes en communication et en vulgarisation scientifique, et un graphiste. Vous trouverez des ressources supplémentaires, notamment du matériel pédagogique sur « la physique des deux infinis », sur notre site internet <http://www.particuleselementaires.fr/affiche>.

Cette affiche présente les composants élémentaires de la matière et les interactions qui les régissent, elles-mêmes véhiculées par d’autres particules. Toutes ces particules sont élémentaires, c’est-à-dire sans dimension spatiale mesurable et sans structure interne connue à ce jour. Les phénomènes mettant en jeu ces particules sont décrits par le Modèle Standard de la physique des particules, élaboré dans les années 1960 et 1970. Il s’appuie d’une part sur la physique quantique, nécessaire pour comprendre le comportement de la matière à très petite échelle, et d’autre part sur la théorie de la relativité d’Einstein, qui rend compte des situations dans lesquelles les vitesses des particules sont proches de celle de la lumière. Moyennant l’introduction d’un petit nombre de paramètres libres déterminés expérimentalement, le Modèle Standard décrit avec une précision remarquable tous les phénomènes subatomiques connus aujourd’hui. La dernière pièce de ce puzzle, le boson de Higgs, a été découverte en 2012 après plusieurs décennies de recherche.

¹ Nom raccourci, selon l’usage courant, en « boson de Higgs » dans la suite de cette brochure.



1. Que représente ce tableau ?



- Le cœur de l’affiche est une classification des composants élémentaires de la matière, rangés par type (lepton ou quark) et par famille. C’est en quelque sorte l’équivalent, pour l’infiniment petit, de la classification périodique des éléments chimiques.
- En dessous sont rassemblées des informations sur les quatre interactions fondamentales.
- Une place spéciale est naturellement réservée au boson de Higgs et au champ auquel il est associé.
- Sur deux côtés, ces éléments sont entourés par une frise illustrant les différentes échelles de grandeur. La présence dans ce parcours de notre étoile, le Soleil, permet d’inclure (en bas du poster à gauche) une brève description de son fonctionnement et d’illustrer la nécessité de considérer le Modèle Standard dans son ensemble pour expliquer le monde qui nous entoure.
- Enfin, un paragraphe, en bas à droite, introduit le concept d’antimatière.

Dans la suite, nous allons nous intéresser plus en détails aux différents blocs qui composent l’affiche des composants élémentaires de la matière 2014.

La frise



La frise des longueurs illustre la manière dont on appréhende la matière selon le pouvoir de résolution dont on dispose. A l'une des extrémités de cette échelle, l'astronomie étudie des objets très étendus et très massifs comme les galaxies : 10^{21} m. Au milieu, on trouve l'échelle macroscopique, celle de tous les jours, symbolisée par une silhouette humaine. Les objets y ont des dimensions de l'ordre du mètre. En poursuivant la descente vers les petites échelles de distance, la structure de la matière apparaît : les cellules sont le fruit d'un agencement complexe de molécules, elles-mêmes formées d'atomes dont la taille caractéristique est de l'ordre de 10^{-10} m. La

quasi-totalité de la masse de l'atome est concentrée dans son noyau, de rayon 10^{-14} m. Le noyau est lui-même composé de protons et de neutrons, environ 10 fois plus petits : 10^{-15} m. Ces nucléons ne sont pas non plus élémentaires : on sait depuis la fin des années 1960 qu'ils sont eux-mêmes composés de particules aujourd'hui considérées comme ponctuelles (jusqu'à preuve du contraire) : les quarks.

Qu'y-a-t-il au-delà ? Nul ne le sait, et peut-être rien ! Pour répondre à cette question, il faudra réaliser des collisions entre particules à des énergies toujours plus élevées, car l'échelle de distance à laquelle une expérience est sensible est inversement proportionnelle à l'échelle d'énergie testée – de la même manière que l'énergie d'un photon varie comme l'inverse de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique qui lui est associée.



Ce qui est certain, c'est qu'il y a forcément une échelle de distance en deçà de laquelle les lois de la physique doivent changer, lorsque la gravité reprend de l'importance. Et il y a de la marge entre la taille maximale des particules élémentaires actuelles (10^{-18} m) et celles des hypothétiques « cordes » (de l'ordre de 10^{-35} m) dont l'existence est proposée par des théories qui cherchent à rassembler dans un même formalisme le Modèle Standard (le côté « infiniment petit » de l'échelle des longueurs) et la relativité générale (qui gouverne le côté « infiniment grand », c'est-à-dire l'Univers dans ses grandes structures).

Le tableau des composants élémentaires

Les particules élémentaires (de matière) sont présentées dans le tableau au centre de l'affiche. Au nombre de 12 (six leptons et six quarks), elles sont classées en trois familles bâties sur le même modèle à quatre particules : de gauche à droite, un neutrino, puis un lepton électriquement chargé et enfin deux quarks, également électriquement chargés. Ces particules ont des caractéristiques différentes (durée de vie, charge électrique, masse, etc.) tandis que les colonnes dans lesquelles elles se trouvent indiquent les interactions fondamentales auxquelles elles sont sensibles.

	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	e électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c ²	u haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c ²	d bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c ²
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	μ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c ²	c charme / charm $t = 10^{-13}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c ²	s étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c ²
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	τ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c ²	t top $t = 9 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c ²	b beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c ²

La matière « ordinaire », celle dont nous sommes faits, contient uniquement des particules de la première famille. En effet, les protons et les neutrons sont caractérisés par les trois quarks de type « u » et « d » qu'ils contiennent (proton : uud ; neutron : udd). Ce sont les constituants des noyaux atomiques ; si on leur ajoute les électrons, on obtient les atomes puis les molécules – en bref toute la chimie. Les

deux autres familles sont composées pour l'essentiel de particules plus lourdes, instables et donc qui n'existent pas à l'état naturel. Néanmoins, elles peuvent être produites dans des accélérateurs (par exemple le LHC au CERN) ou par des rayons cosmiques (des particules énergétiques en provenance du cosmos qui interagissent avec l'atmosphère terrestre). On a ainsi pu découvrir ces particules supplémentaires, puis étudier leurs propriétés.

L'affiche associe trois paramètres à chaque particule :

- La durée de vie : infinie (symbole « ∞ ») pour les particules stables comme l'électron ; finie (et exprimée en fractions de secondes) pour celles qui sont instables et qui se désintègrent en particules plus légères sous l'action des interactions fondamentales.
- La charge électrique, exprimée en (sous-)multiple de la charge élémentaire e , égale à la valeur absolue de la charge de l'électron : $1,6 \times 10^{-19}$ C.
- La masse, donnée dans une unité bien adaptée à la physique des particules : le « gigaélectron-volt divisé par la vitesse de la lumière au carré », GeV/c^2 . L'électron-volt (symbole eV) est une unité d'énergie ; sa valeur est définie par l'énergie cinétique acquise par un électron, initialement au repos, soumis à une différence de potentiel de 1 volt – le GeV (1 milliard d'électron-volt) vaut donc $1,6 \times 10^{-10}$ joule. Le GeV/c^2 est bien homogène à une masse comme le montre la formule d'Einstein $E=mc^2$. Un proton a une masse d'environ 1 dans cette unité. On passe du GeV/c^2 au kilogramme et vice-versa via le facteur de conversion suivant :

$$1 \text{ GeV}/c^2 \Leftrightarrow 1,8 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

u haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002 \text{ GeV}/c^2$	
c charme / charm $t = 10^{-12} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 1,3 \text{ GeV}/c^2$	
t top $t = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 173 \text{ GeV}/c^2$	

Les particules élémentaires ont des masses très différentes ; cette diversité est illustrée par les tailles des symboles bleus en forme de poids présents dans chaque case du tableau. Dans le cadre du Modèle Standard, ces particules acquièrent leur masse via le champ de Higgs dont nous parlerons plus loin. En revanche, leurs interactions (par exemple celles liées au champ électrique) suivent un motif identique d'une famille à l'autre.



En plus de ces caractéristiques qui nous sont plutôt familières puisqu'elles sont présentes à l'échelle macroscopique, les particules possèdent également une propriété intrinsèque, d'origine purement quantique (et donc sans équivalent à notre échelle) : le spin. Dans cette brochure, nous ne tenterons pas d'expliquer ce concept en détail mais il est important de le mentionner car il a des conséquences importantes sur le comportement des particules.

Les douze particules élémentaires de matière ont un spin demi-entier (en fait $\frac{1}{2}$) : ce sont des fermions, du nom du physicien Enrico Fermi (1901-1954, prix Nobel de physique 1938). Les fermions obéissent au « principe d'exclusion de Pauli » (Wolfgang Pauli, 1900-1958, prix Nobel de physique 1945) suivant lequel deux fermions identiques ne peuvent exister dans le même état quantique. Cette règle explique en particulier pourquoi, dans les atomes, les électrons sont disposés autour du noyau en couches associées à des niveaux d'énergie différents.

En physique des particules, les interactions (ou forces) fondamentales sont transmises par l'intermédiaire de particules médiatrices appelées bosons (de Satyendranath Bose, 1894-1974) et qui ont un spin entier. Au contraire des fermions, il n'y a aucune restriction sur le nombre de bosons dans le même état quantique – ainsi, un laser est un exemple de phénomène cohérent entre photons qui, comme nous le verrons dans la suite, sont les particules médiatrices de l'interaction électromagnétique.

Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Les bosons médiateurs connus (des interactions faible, électromagnétique et forte) ont tous un spin 1. L'hypothétique graviton, la particule médiatrice de la gravitation dans une description quantique de cette interaction (qui n'existe pas à l'heure actuelle), aurait lui un

spin 2. Enfin, le boson de Higgs est un boson d'un type nouveau puisque son spin est égal à 0. C'est la seule particule élémentaire connue dans ce cas.

Le Soleil

Soleil
10⁹ m



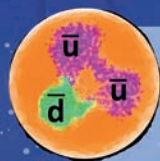
Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

Le fonctionnement du Soleil fait appel aux quatre interactions fondamentales ! Si l'une d'entre elles était absente, il n'y aurait pas d'étoile dans l'Univers et donc certainement pas de vie – du moins telle que nous la connaissons.

La gravité est si intense dans le Soleil qu'elle y produit des densités d'hydrogène assez fortes pour combattre la répulsion coulombienne entre les protons (des charges positives se repoussent) et pour amorcer la réaction primordiale de fusion de deux protons en deutéron (un isotope naturel de l'hydrogène dont le noyau contient un proton et un neutron). C'est un processus dû à l'interaction faible dont le taux gouverne la lente combustion des étoiles. C'est ensuite l'interaction forte qui est à l'œuvre dans les chaînes de réactions nucléaires qui suivent et qui produisent d'autres noyaux. Enfin, la chaleur et la lumière que nous recevons proviennent de la transformation en énergie électromagnétique de l'énergie créée dans toutes ces différentes réactions nucléaires.

L'antimatière



Antiproton

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

À chaque particule de matière correspond une particule d'antimatière. Une particule et son « antiparticule » ont beaucoup de propriétés communes (même masse, même spin) mais des « charges » opposées (en particulier la charge électrique). C'est ainsi qu'à côté du tableau des quarks et leptons, on pourrait mettre celui des antiquarks et des

antileptons. Néanmoins, nous savons maintenant qu'il n'y a presque pas d'antimatière dans l'Univers. Celle que nous observons provient de réactions entre particules élémentaires produites lors de collisions à haute énergie, par des rayons cosmiques ou grâce à des accélérateurs de particules. Lors de ces collisions, si l'énergie est suffisamment élevée, il peut y avoir conversion d'énergie en paires constituées d'une particule et de son antiparticule associée (un exemple de l'équivalence entre matière et énergie démontrée par Einstein).

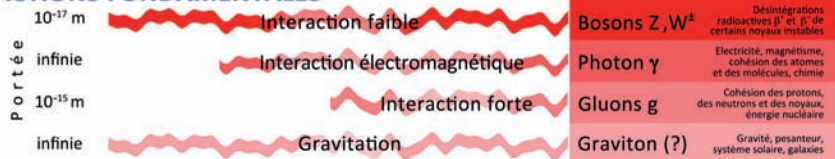
La première antiparticule, l'antiélectron, ou positron, fut découverte en 1932 par Carl Anderson (1905-1991, prix Nobel de physique 1936), quelques années après que son existence avait été prédite par le physicien théoricien Paul Dirac (1902-1984, prix Nobel de physique 1933).

Par convention, si une particule est représentée par la lettre « x », son antiparticule sera en général désignée par « $\bar{x}$ » : la même lettre mais surmontée d'une barre horizontale. Ainsi l'antiparticule du proton p est l'antiproton $\bar{p}$ (prononcer « p barre »). Lorsque la charge électrique d'une particule est utilisée pour la désigner (par exemple « e^- » pour l'électron), son antiparticule aura le même symbole avec une charge opposée – et donc « e^+ » pour le positron (ou antiélectron). En effet, certains « nombres quantiques » (en particulier la charge électrique) sont opposés entre particules et antiparticules.

2. Les interactions fondamentales

Généralités

INTERACTIONS FONDAMENTALES



Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

La bande de l'affiche des composants élémentaires de la matière reproduite ci-dessus donne une vue d'ensemble des quatre interactions fondamentales auxquelles sont soumises les particules élémentaires. De haut en bas : l'interaction faible, l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et la gravitation.

Une propriété importante d'une interaction est sa portée, c'est-à-dire l'échelle de distance jusqu'à laquelle cette force opère de façon significative. Les portées des quatre interactions sont indiquées dans une colonne sur la gauche de la partie de l'affiche consacrée aux forces fondamentales. Ces valeurs n'ont rien à voir avec les longueurs des « lignes ondulées » horizontales situées à leur droite : ces lignes servent à indiquer à quelles interactions les particules élémentaires (situées dans le tableau au-dessus) sont soumises – les lignes pointillées verticales aident à faire ces associations.

Une particule sera sensible à une force donnée si sa charge associée est non nulle. Comme son nom le laisse supposer, la charge électrique est la charge associée à l'interaction électromagnétique. Il existe également des charges faible et forte (ou de couleur) pour les interactions du même nom et la masse peut être vue comme une sorte de « charge gravitationnelle ».

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le chapitre précédent, deux particules interagissent en échangeant en permanence d'autres particules, les bosons médiateurs qui véhiculent l'interaction associée. Ces bosons sont rassemblés dans le tableau à dominante rouge-rose sur la droite de l'affiche :

- un boson neutre (le Z) et deux chargés (les W^+ et W^-) pour l'interaction faible ;
- le photon (γ) pour l'interaction électromagnétique ;
- huit gluons (g) pour l'interaction forte ;
- l'hypothétique graviton, une particule de spin 2 prédite par certaines théories, mais impossible à détecter pour le moment car sa signature expérimentale est bien trop ténue pour les technologies actuelles.



Principales caractéristiques des interactions fondamentales

Deux de ces interactions, l'électromagnétisme et la gravité, sont connues par l'expérience quotidienne et sont des objets d'étude de la physique « classique ». Ces forces ont en commun d'être de portée infinie et de décroître comme l'inverse du carré de la distance qui sépare deux objets qui y sont soumis. En théorie quantique, ceci implique que les particules véhiculant ces interactions sont de masse rigoureusement nulle. C'est bien le cas du photon (dont la vitesse dans le vide est invariablement égale à $c : 299\,792\,458\text{ m/s}$) et ce serait donc également le cas du graviton (si celui-ci existe).

Arrêtons-nous un instant sur la gravitation, une interaction très particulière à bien des égards. On peut tout d'abord remarquer que c'est une force toujours attractive (il n'existe pas de « masse négative ») et donc impossible à compenser : deux masses s'attireront toujours, quelle que soit la distance qui les sépare. Au niveau théorique, la gravitation pose également problème car on ne sait pas la décrire à l'aide du formalisme de la « théorie quantique des champs », utilisé avec succès pour les trois autres interactions. La relativité générale et le Modèle Standard ont bien du mal à faire bon ménage et ce malgré les efforts en ce sens de très nombreux physiciens. Toutefois, ceci ne remet pas en cause la physique des particules car la gravitation y joue un rôle mineur du fait de sa très faible intensité : on peut donc tout simplement la négliger au niveau subatomique et ce jusqu'à des énergies très élevées (seulement atteintes aux premiers instants de l'Univers).

Les deux autres forces, l'interaction forte et l'interaction faible, n'ont été mises en évidence qu'au XX^e siècle par l'étude des noyaux atomiques. Pour expliquer que des protons et des neutrons puissent être liés dans un noyau, il a fallu faire appel à une interaction plus intense que la force coulombienne qui tend à séparer les protons (de charge électrique $+e$) les uns des autres et n'agit pas sur les neutrons de charge électrique nulle. Cette force nucléaire à courte distance (10^{-15} m) et de grande intensité est justement due à l'interaction forte. On sait maintenant que les nucléons (protons et neutrons) et beaucoup d'autres particules découvertes depuis la fin des années 1940 ne sont pas réellement élémentaires. Appelées « hadrons » de manière générique, elles sont

formées de quarks qui interagissent en échangeant des gluons qui les « collent ».

Contrairement par exemple aux électrons, il est impossible d'observer un quark isolé. En effet, l'interaction forte a la propriété de croître avec la distance séparant deux quarks ! En conséquence, un quark à peine produit est « obligé » de former un hadron avec un ou deux autres (anti) quarks. Ce comportement est relié à une autre propriété de l'interaction forte : ses particules médiatrices, les gluons, sont également sensibles à cette force. C'est un peu comme si le photon, porteur de l'interaction électromagnétique, avait une charge électrique non nulle.

Tous ces éléments permettent de comprendre pourquoi cette force est à la fois très difficile à décrire mathématiquement et très riche. Les gluons, qui ont été mis en évidence en 1979, sont de masse nulle ; néanmoins, l'interaction forte reste de portée très faible ce qui explique qu'on ne puisse pas l'observer en physique classique ni même à l'échelle atomique.

La quatrième interaction est la force faible qui gouverne en particulier les désintégrations de type bêta des particules élémentaires et des noyaux. C'est également une force à portée subatomique (10^{-17} m) à cause des masses élevées des particules médiatrices qui la véhiculent : les bosons intermédiaires $W^\pm$ et Z , plus de 80 fois plus massifs qu'un proton.

Un des grands succès de la physique des particules dans les années 1970-1980 a été d'unifier dans un même formalisme l'interaction faible et l'électromagnétisme qui apparaissent, à haute énergie, comme deux facettes d'une même force dite « électrofaible ». Cette avancée théorique a été couronnée expérimentalement par la découverte des particules $W^\pm$ et Z au CERN en 1983, puis par l'étude précise de leurs propriétés, notamment dans le grand collisionneur électron-positron LEP qui a fonctionné de 1989 à 2000 dans le tunnel de 27 km de circonférence maintenant occupé par le LHC. L'unification électrofaible est un des piliers principaux du Modèle Standard et sa confirmation expérimentale a été décisive pour imposer cette théorie comme la meilleure pour décrire le monde des particules élémentaires. Trois décennies plus tard, le Modèle Standard reste, malgré ses limitations, indétrônable !



3. Quarks et leptons

Les particules élémentaires de matière sont classées en deux catégories : les quarks et les leptons.

Les quarks

Les quarks sont les composants des protons et des neutrons (qui forment l'essentiel de la « matière ordinaire » dont nous-même et notre environnement quotidien sont faits) et plus généralement des particules appelées hadrons. Il existe six espèces ou « saveurs » de quarks : up (« haut », symbole u), down (« bas », d), charm (« charme », c), strange (« étrange », s), top (« dessus », t), bottom ou beauty (« dessous » ou « beauté », b). Ces noms sont historiques et n'ont pas de signification physique.

- Les quarks up et down ont des propriétés similaires, reliées au niveau théorique par leur orientation (vers le « haut » ou vers le « bas ») dans un espace mathématique abstrait, utilisé pour décrire l'effet des interactions faible et forte.
- Le quark étrange tire lui son nom des caractéristiques « étranges » (c'est-à-dire inhabituelles) que présentaient des particules d'un type nouveau, découvertes à la fin des années 1940 et au début des années 1950. On comprit plus tard que ces propriétés étaient dues à la présence d'un quark supplémentaire, le « s ».
- Le quark charmé, découvert simultanément en novembre 1974 par deux expériences aux Etats-Unis (l'une sur la côte ouest au laboratoire SLAC situé près de San Francisco, l'autre sur la côte est au laboratoire de Brookhaven près de New-York), avait été introduit quelques années auparavant par les théoriciens Glashow, Iliopoulos et Maiani (connus sous l'acronyme « GIM ») pour expliquer l'absence de certains phénomènes, prévus par un modèle à trois quarks mais pas observés. L'ajout de ce quatrième quark restaurait comme par « enchantement » l'accord entre théorie et expérience.
- Enfin, les quarks b et t, découverts au laboratoire Fermi (« Fermilab ») situé près de Chicago en 1977 et 1995, ont été nommés par analogie avec les quarks u et d. Plus généralement,

les quarks u, c et t sont dits « de type up » et les quarks d, s et b « de type down » car ils partagent de nombreuses propriétés communes en terme d'interactions.

Les quarks sont sensibles aux interactions forte et faible ainsi qu'à la force électromagnétique. Leur charge électrique est fractionnaire :

QUARKS	
u haut / up  $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002 \text{ GeV}/c^2$	d bas / down  $t = 15 \text{ min}$ $Q = -e/3$ $m = 0,005 \text{ GeV}/c^2$
c charme / charm  $t = 10^{-13} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 1,3 \text{ GeV}/c^2$	s étrange / strange  $t = 10^{-10} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 0,1 \text{ GeV}/c^2$
t top  $t = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 173 \text{ GeV}/c^2$	b beau / beauty / bottom  $t = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 4,2 \text{ GeV}/c^2$

elle vaut $2e/3$ pour les quarks de type up et $-e/3$ pour ceux de type down (où e est la charge électrique « élémentaire », $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$... qui porte donc bien mal son nom !). Les quarks n'existent pas à l'état libre car ils restent confinés par l'interaction forte dans des particules composites, les hadrons – voir le chapitre sur les interactions fondamentales.

Pour des raisons théoriques, les quarks sont classés en trois familles.

- La première est constituée des quarks up et down qui sont les constituants élémentaires des nucléons. Les protons et les neutrons sont formés de trois quarks : uud et udd respectivement.
- Les deux autres familles sont des répliques de la première et sont formées de quarks plus lourds, instables, dont les durées de vie sont très courtes (inférieures à 10^{-10} s) et qui se désintègrent par interaction faible en quarks plus légers et en leptons. Les masses des quarks sont très disparates : le plus lourd, le top, est environ 180 fois plus lourd qu'un proton (lui-même constitué de trois quarks légers) : il pèse autant qu'un atome d'or. Le quark top se désintègre si rapidement que l'interaction forte « n'a pas le temps » de le forcer à se combiner avec d'autres quarks pour former une particule : il n'existe donc pas de hadron contenant un ou plusieurs quarks t.

L'interaction faible est la seule force qui peut changer la saveur d'un quark : par l'intermédiaire des bosons W chargés, on peut passer d'un



quark de type up à un quark de type down (par exemple $t \rightarrow b + W^+$), voire changer de famille comme dans la désintégration rare $b \rightarrow u + W^-$.

Enfin, les quarks portent une charge de couleur, non indiquée sur le tableau des constituants élémentaires et qui est à l'interaction forte ce que la charge électrique est pour la force électromagnétique. Un quark peut avoir trois couleurs, appelées par convention rouge, bleu et vert. Un antiquark a l'une des « anticouleurs » correspondantes : antirouge, antibleu et antiverd.

Les quarks forment des particules composites « blanches », c'est-à-dire sans charge de couleur. Il y a deux manières de former ces hadrons : soit en combinant un quark et un antiquark dont la couleur et l'anticouleur s'annulent (par exemple rouge et antirouge) ; on parle alors de « méson ». Soit en associant trois quarks porteurs chacun d'une couleur différente ; de telles particules sont appelées « baryons » – par exemple le proton et le neutron.

Les mésons et les baryons sont appelés génériquement hadrons ; il en existe des centaines. Rien n'interdit a priori d'avoir des particules composites formées d'un nombre plus grand de quarks. Certains hadrons découverts ces dernières années pourraient ainsi être des « tétraquarks » (deux quarks, deux antiquarks) ; par contre, aucune trace de « pentaquarks » (quatre quarks, un antiquark) pour le moment.

« Quark » est un mot inventé par l'écrivain James Joyce dans son livre « Finnegans Wake » où apparaît la phrase « Three quarks for Muster Mark ! » qu'on pourrait traduire par « Trois quarks pour Maître Mark ! ». C'est Murray Gell-Mann (né en 1929, prix Nobel de physique en 1969) qui introduisit ce terme pour désigner les particules du modèle qu'il présenta en 1964 pour expliquer la structure des hadrons. George Zweig (né en 1937) proposa la même année et de manière indépendante un modèle similaire dans lequel les « quarks » s'appelaient les « as ». Ces concepts, utilisés à l'origine comme des artifices mathématiques, ont progressivement acquis une réalité physique.

Les leptons

Les leptons sont des particules de matière sensibles à l'interaction faible mais pas à l'interaction forte. Les leptons chargés (électron, muon et tau) sont aussi sensibles à l'interaction électromagnétique. L'électron (e) et son compagnon le neutrino électron (ν_e) complètent la première famille formée des quarks u et d . Il existe deux autres paires {lepton chargé + neutrino}, associées respectivement au muon (2^e famille) et au tau (3^e famille). Ces deux particules ont été découvertes respectivement en 1936-1937 et en 1976.

LEPTONS	
ν_e neutrino électron 	e électron 
$t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	$t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051 \text{ GeV}/c^2$
ν_μ neutrino muon 	μ muon 
$t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	$t = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 0,106 \text{ GeV}/c^2$
ν_τ neutrino tau 	τ tau 
$t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	$t = 2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 1,78 \text{ GeV}/c^2$

L'électron, le muon et le tau sont des « cousins » qui ont des propriétés analogues (notamment une même charge électrique $-e$) malgré des masses très différentes (figurées par les symboles bleus en forme de poids sur l'affiche) et des temps de vie très variables : si l'électron est stable, le muon et le tau se désintègrent rapidement par interaction faible en particules plus légères, tout comme les quarks des 2^e et 3^e familles.

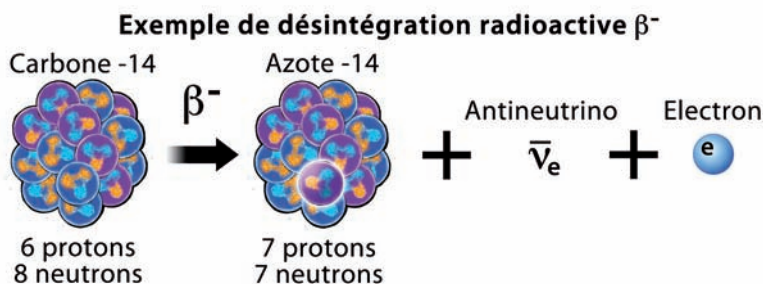
Chacune des trois familles de particules élémentaires de matière contient un neutrino. Ces particules jouent un rôle important dans le Modèle Standard bien qu'elles soient très difficiles à observer. Les neutrinos sont électriquement neutres et interagissent très peu avec la matière : un neutrino peut traverser toute la Galaxie sans subir aucune

 interaction ! Et pourtant, les neutrinos sont produits en abondance dans l'Univers : naturellement au cours des réactions de fusion qui ont lieu au cœur des étoiles, ou artificiellement dans les réacteurs des centrales nucléaires qui fournissent une part importante de l'électricité que nous consommons.

L'existence des neutrinos a été postulée en 1930 pour expliquer la désintégration nucléaire bêta qui semblait violer la conservation de l'énergie. Leur « inventeur », Pauli, avait supposé l'existence d'une nouvelle particule, légère et indétectable (vite baptisée neutrino, « petit neutre » en italien par Fermi, par opposition au « gros neutre » le neutron), émise lors de chaque désintégration bêta, et qui emportait la part – variable – d'énergie manquante dans l'équation bilan auparavant incomplète :



Le terme initialement manquant, « (...) + $\bar{\nu}_e$ » fut introduit quelques années plus tard par Fermi dans sa théorie de l'interaction faible qui sera généralisée dans les années 1960-1970 pour donner la théorie électrofaible, l'un des piliers du Modèle Standard.



Les trois neutrinos furent découverts en 1956 (neutrino électron), 1962 (neutrino muon) et 2000 (neutrino tau). On a longtemps pensé qu'ils avaient une masse rigoureusement nulle mais des résultats expérimentaux récents montrent qu'ils peuvent osciller, c'est-à-dire changer de saveur lorsqu'ils parcourent de grandes distances (par exemple un neutrino électron émis par le Soleil est détecté sur Terre comme neutrino muon). Ce phénomène, déroutant mais bien réel, se

comprend sur le plan théorique si l'on suppose que les neutrinos ont des masses différentes – et donc non nulles pour au moins deux des trois neutrinos. On ne connaît pas encore les valeurs absolues de ces masses mais l'expérience montre qu'elles sont très petites, au maximum de l'ordre de eV/c^2 – à comparer avec la plus légère des particules de matière chargées, l'électron, dont la masse vaut environ $511\,000\text{ eV}/c^2$. Cette propriété et ce comportement montrent que la conservation de la saveur leptonique n'est pas un dogme chez les neutrinos. C'est une raison supplémentaire pour chercher un tel phénomène du côté des leptons chargés, comme expliqué dans la suite.

L'étude des neutrinos est une discipline en plein essor depuis les premiers résultats sur les oscillations de neutrinos obtenus à la charnière des XX^{e} et XXI^{e} siècles par les expériences SuperKamiokande (Japon) et SNO (Canada).

Les trois leptons chargés ont également des « saveurs leptoniques » bien distinctes. Ainsi, la désintégration directe d'un muon en un électron (et un photon) est interdite dans le cadre du Modèle Standard car il est impossible de passer de la saveur « muon » à la saveur « électron » : c'est un exemple, parmi beaucoup d'autres, de loi de conservation valables en physique des particules (conservation de la charge électrique, etc.).

Si la désintégration $\text{muon} \rightarrow \text{électron} + \text{photon}$ ne devrait pas se produire, des expériences la cherchent néanmoins : si elle était observée, ce serait une preuve indiscutable de l'existence d'une physique nouvelle, non prédite par le Modèle Standard. Par contre, une désintégration du muon en électron permise – et effectivement observée – est la réaction suivante :

$\text{muon} \rightarrow \text{électron} + \text{neutrino muon} + \text{antineutrino électron},$
ou $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ avec les notations de l'affiche.

Dans ce cas, la conservation des saveurs leptoniques est respectée puisque le muon et le neutrino muon ont la même saveur muonique et l'électron et l'antineutrino électron des saveurs électroniques opposées (et donc qui s'annulent).



4. Le boson de Higgs

Le boson de Higgs – et le champ de Higgs auquel il est associé – est le principal ajout sur la nouvelle version de l’affiche des composants élémentaires de la matière. En effet, bien qu’il s’agisse d’un concept clef du Modèle Standard présent dans la théorie depuis plusieurs décennies, la preuve de son existence n’a été apportée qu’en 2012 au grand collisionneur LHC du CERN. Cette découverte de première importance qui clôt la recherche des particules élémentaires prédites par le Modèle Standard se devait de figurer à une place de choix sur ce poster !



Le développement du Modèle Standard date des années 1960, une époque où de nombreuses théories étaient en concurrence pour décrire le monde des particules élémentaires. C’est une accumulation de résultats expérimentaux, à la fois variés et de plus en plus précis, qui a permis au Modèle Standard de s’imposer peu à peu comme la théorie de référence.

Un des problèmes « de jeunesse » du Modèle Standard était que les théoriciens n’arrivaient pas à bâtir une théorie cohérente dans laquelle les particules élémentaires avaient une masse non nulle – ce qui était bien le cas expérimentalement ! Une piste prometteuse pour résoudre ce problème vint de développements dans un domaine totalement différent, celui de la supraconductivité. En 1964, trois groupes travaillant

indépendamment adaptent au cas de la physique des particules un modèle mis au point par Philip Warren Anderson (né en 1923, prix Nobel de physique 1977). Ce sont, dans l'ordre de publication des articles présentant leurs travaux :

- les Belges Robert Brout et François Englert
- le Britannique Peter Higgs
- les Américains Gerald Guralnik et Carl Richard Hagen et le Britannique Tom Kibble.

Le mécanisme qu'ils ont proposé a permis de compléter le Modèle Standard. Il fournit une masse aux particules élémentaires tout en maintenant la cohérence mathématique de la théorie (les particules interagissent directement avec le champ de Higgs ; le boson de Higgs est une manifestation de ce champ). Ce mécanisme prédit également l'unification à haute énergie des interactions électromagnétique et faible en une force unique : l'interaction électrofaible caractérisée par ses bosons médiateurs $W^\pm$ et Z . C'est ce second point qui sera d'abord confirmé expérimentalement au CERN dans les années 1970-1980, permettant ainsi au Modèle Standard de devenir la « bonne » théorie pour décrire les particules élémentaires.

De nombreux accélérateurs, notamment le LEP au CERN et le Tevatron à Fermilab (un collisionneur proton-antiproton situé près de Chicago et qui détenait le record d'énergie des collisions jusqu'au démarrage du LHC), ont ensuite cherché le boson de Higgs. Une tâche très difficile car on savait que cette particule avait un taux de production très faible et qu'elle était très massive – et donc demandait des collisions très énergétiques pour être produite. De plus, la valeur de sa masse était inconnue, ce qui rendait sa recherche encore plus complexe. Il s'agissait de trouver une aiguille unique (le boson de Higgs) dans une multitude de bottes de foin, chacune correspondant à une gamme de masses possibles qu'il fallait fouiller en parallèle des autres et avec des outils adaptés.

Finalement, en 2012, près d'un demi-siècle après sa prédiction théorique, le « boson de Higgs » a été découvert par les expériences ATLAS et CMS du LHC (CERN). La masse de ce boson est environ $125 \text{ GeV}/c^2$, soit 133 fois celle du proton. Les mesures précises de ses propriétés sont en cours et se prolongeront pendant de nombreuses années. Pour l'instant,



tous les résultats obtenus sont conformes, aux incertitudes près, aux prédictions du Modèle Standard. L'avenir nous dira si cette tendance se confirme ou si la Nature a choisi un boson de Higgs un peu différent.

Maintenant que la réalité du mécanisme de Higgs est bien établie, la question de son appellation est revenue sur le devant de la scène. Pour mieux rendre compte de sa généalogie, de nombreux physiciens s'efforcent aujourd'hui de parler de « boson scalaire » et de « mécanisme BEH » (pour « Brout-Englert-Higgs »), voire de mécanisme d'« (Anderson-) Brout-Englert-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble ». Par contre, il semble difficile d'identifier cette particule à une autre lettre que le « H majuscule » que l'on retrouve dans toutes les équations depuis des années.

Pour conclure sur ce point, rappelons que le prix Nobel de physique (décerné au plus à trois personnes physiques) a récompensé en 2013 François Englert et Peter Higgs (Robert Brout est décédé en 2011) *« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à [la] compréhension de l'origine des masses des particules subatomiques² et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale associée par les expériences ATLAS et CMS du LHC au CERN »*. Cette formulation, qui associe théorie et expérience, tempère les conditions restrictives pour l'attribution du prix Nobel. En physique des hautes énergies comme dans tous les domaines scientifiques, la connaissance progresse grâce à des allers-retours permanents entre physiciens théoriciens et expérimentateurs.

5. Quoi de neuf depuis 2005 ?

Une décennie a passé depuis la première version de l'affiche des composants élémentaires de la matière. Cela peut sembler long mais c'est en fait assez court dans la mesure où les projets actuels s'inscrivent de plus en plus dans la durée. Ils demandent des ressources importantes – tant humaines que financières – et nécessitent souvent des avancées technologiques qui peuvent prendre des années pour passer de la phase « recherche et développement » à la production en série. En simplifiant à l'extrême, on pourrait dire que les expériences de demain se préparent aujourd'hui et qu'on a commencé à y penser depuis (avant-)hier !

² Au lieu de « particules subatomiques », il aurait été plus correct de parler de « particules élémentaires ».

Néanmoins, plusieurs avancées importantes ont eu lieu depuis 2005. En physique des particules, la découverte majeure est évidemment celle du boson de Higgs. De nombreuses mesures de précision ont également été menées à bien dans différents accélérateurs, tant pour comparer prédictions théoriques et résultats expérimentaux que pour rechercher des phénomènes très rares dans le cadre du Modèle Standard. Toutes ces recherches vont dans le même sens : cette théorie continue de fonctionner très bien, voire trop bien. Aucune expérience n'a encore réussi à la mettre en défaut de manière concluante !

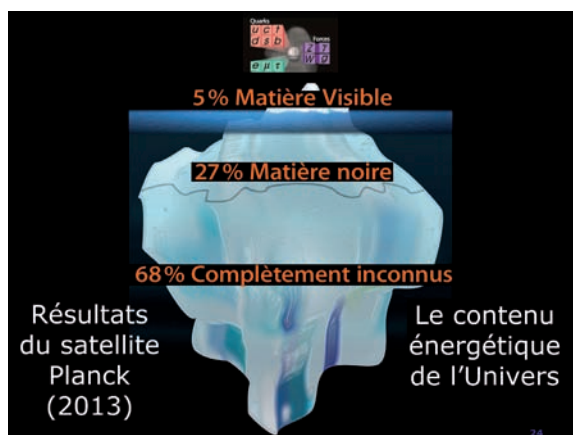
Pourtant, il est certain qu'il y a une « nouvelle physique » au-delà du cadre du Modèle Standard. En effet, il y a de nombreuses questions auxquelles cette théorie ne répond pas – les principales sont présentées dans le prochain chapitre. Il existe donc de nombreux modèles qui visent à étendre le Modèle Standard et prévoient de nouveaux phénomènes, notamment des particules supplémentaires. Mais, pour l'instant, ces dernières n'ont été ni découvertes au LHC (où elles seraient produites lors des collisions énergétiques) ni mises en évidence indirectement par des mesures de précision – sensibles aux « perturbations » que ces nouvelles particules pourraient introduire dans la mécanique bien huilée du Modèle Standard.

En juin 2015, le LHC a redémarré après un long arrêt consacré à la maintenance et à l'amélioration de ses installations (complexe accélérateur et détecteurs). La communauté des physiciens espère que la nouvelle physique apparaîtra dans cette seconde phase, marquée par des collisions à la fois plus fréquentes et plus énergétiques. D'autres expériences doivent démarrer prochainement, comme la « super usine à saveur » Belle-2 (au Japon) qui étudiera des désintégrations rares du quark b , ou MEG qui cherche la désintégration « interdite » antimuon $\rightarrow$ positron + photon. A plus long terme, des projets de futurs accélérateurs sont en discussion. Mais, sans signe clair de nouvelle physique, il sera difficile de faire les bons choix et d'obtenir les ressources nécessaires pour construire et faire fonctionner ces installations.

La physique des hautes énergies est aujourd'hui à la croisée des chemins. Depuis des décennies, les expériences ont apporté leur lot de nouveautés et donné des pistes à explorer pour les projets futurs. Ce

n'est pas le cas actuellement. Le boson de Higgs a pour l'instant confirmé le Modèle Standard mais ne nous montre pas la direction du prochain pas à effectuer. De nouveaux résultats sont attendus dans les prochaines années, notamment au LHC.

D'autres domaines sont actuellement en plein essor comme la physique des neutrinos. De nombreuses expériences complémentaires étudient les oscillations de neutrinos, mises en évidence pour la première fois il y a une quinzaine d'années. Méthodiquement, tous les paramètres gouvernant ce phénomène sont mesurés avec précision, ouvrant la voie aux expériences du futur. L'étude des propriétés des neutrinos passe également par la mesure directe de leurs masses (très faibles et donc un véritable défi expérimental, sans parler des difficultés théoriques pour expliquer de telles valeurs) et la détermination de leur nature. En particulier, les neutrinos pourraient être leurs propres antiparticules. Confirmer ou infirmer cette hypothèse aurait des conséquences importantes sur les théories qui vont au-delà du Modèle Standard.



La cosmologie, c'est-à-dire l'étude de l'Univers (sa composition, son histoire et son évolution), a également beaucoup évolué ces dernières années grâce aux observations menées à partir de télescopes au sol ou d'instruments embarqués sur des satellites. Chaque nouveau résultat a apporté son lot de nouvelles questions. En particulier, les mesures précises du « rayonnement de fond diffus cosmologique » (le CMB, la première lumière de l'Univers, émise à peine 380 000 ans après le Big-

bang) par les satellites américain WMAP puis européen Planck ont permis de consolider le Modèle Standard cosmologique – l'équivalent, pour l'infiniment grand, du Modèle Standard de la physique des particules. La composition de l'Univers est connue avec précision : 5 % de matière ordinaire et de rayonnement, 27 % de « matière noire » (invisible dans les télescopes mais dont l'influence gravitationnelle se fait sentir à l'échelle des galaxies et des amas de galaxies) et 68 % « d'énergie noire », une composante encore plus mystérieuse que la matière noire mais qui serait responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers actuellement observée.

6. Quelques questions toujours en suspens

Malgré l'apparente simplicité du tableau des constituants élémentaires de la matière, de nombreux mystères restent encore à élucider. Voici quelques-unes des questions que les physiciens se posent à l'heure actuelle.

Pourquoi quatre interactions fondamentales ?

Nous n'en savons rien ! Comme nous l'avons vu avec l'exemple du Soleil, chacune de ces quatre interactions joue un rôle important et irremplaçable.

Néanmoins, l'idée que des phénomènes, en apparence très différents, puissent avoir une cause commune est un des moteurs du progrès scientifique. La loi de la gravitation universelle de Newton (qui relie la chute des corps et les mouvements des astres) et l'électromagnétisme de Maxwell (qui rassemble électricité et magnétisme) sont deux exemples de tels rapprochements.

L'unification des quatre interactions fondamentales fait partie des axes de recherche principaux de la physique des particules. Une première étape a été franchie il y a une trentaine d'années avec l'unification de l'interaction faible et de la force électromagnétique dans un même cadre : l'interaction électrofaible. Celle-ci se manifeste à haute énergie – environ 100 GeV. La suite logique de ce processus est d'y ajouter l'interaction forte. Mais, si convergence il y a, elle ne devrait se manifester qu'à des échelles d'énergie encore bien plus élevées (10^{15} ou 10^{16} GeV), totalement hors de portée des expériences actuelles. L'étape



ultime, l'ajout de la gravité à ce formalisme, est encore plus éloignée et se heurte à des problèmes mathématiques non résolus pour le moment.

Pourquoi trois familles ?

Là non plus, il n'y a pas encore de réponse. Seule la première famille entre dans la composition de la matière ordinaire mais l'expérience a montré qu'il en existait deux autres répliques, formées de particules plus massives et instables. En revanche, des mesures de précision et la découverte du boson de Higgs à une masse compatible avec le Modèle Standard ne favorisent pas l'existence d'une quatrième famille de particules organisée sur le même modèle : deux quarks, un lepton chargé et un neutrino léger. Si le tableau de particules élémentaires actuelles n'est pas complet, les particules supplémentaires seraient de nature différente – de quoi alimenter peut-être de futures mises à jour de cette affiche !

Pourquoi les constituants de la matière et les particules qui véhiculent les interactions ont-elles des masses si disparates ?

Encore une énigme... Dans le cadre du Modèle Standard, les particules élémentaires interagissent avec le champ de Higgs, présent dans tout l'espace, et acquièrent une masse par ce phénomène. Par contre, les valeurs des masses sont des paramètres libres de la théorie : il n'existe aucune règle pour les calculer ! Et rien non plus pour expliquer pourquoi la plus lourde des particules élémentaires connues, le quark top, pèse autant qu'un atome d'or et au moins 200 milliards de fois plus qu'un neutrino !

Profitons de cette question pour clarifier un point qui est souvent source de confusion : le champ de Higgs n'agit que sur les particules élémentaires. D'autres phénomènes entrent en jeu pour fixer les masses des particules composites. Ainsi, protons et neutrons ont une structure interne gouvernée par l'interaction forte et beaucoup plus complexe qu'un simple assemblage de trois quarks — uud et udd . Une manière de le voir est d'observer que la somme des masses de ces quarks ne correspond qu'à quelques pourcents de la masse des nucléons ! L'essentiel de la masse des protons et des neutrons provient donc des propriétés de l'interaction forte qui maintient les quarks ensemble. C'est également le cas pour tous les autres hadrons.

Quelle est la nature des neutrinos ?

C'est une question ouverte depuis les années 1930. Les particules élémentaires de matière sont pour la plupart des particules « de Dirac », c'est-à-dire différentes de leurs antiparticules. Puisque les neutrinos sont neutres, ils pourraient être identiques à leurs antiparticules (la charge électrique change de signe lors du passage d'une particule à son antiparticule) et donc être des particules de « Majorana » (du nom du physicien italien Ettore Majorana, 1906-1938). Si le neutrino était effectivement une particule de Majorana, cela aurait des conséquences importantes sur le plan théorique. Malheureusement, comme rien n'est simple avec le neutrino, il est extrêmement difficile de répondre à cette question, étudiée par plusieurs expériences, actuellement en fonctionnement ou prévues.

Pourquoi l'antimatière est-elle absente de notre Univers ?

Juste après le Big-bang, l'Univers devait contenir autant de matière que d'antimatière. Aujourd'hui, l'Univers observable nous apparaît comme composé presque uniquement de matière : nulle part on n'observe de « zone frontière » où matière et antimatière cohabiteraient et s'annihileraient en dégageant de l'énergie sous forme de photons. De ces deux éléments on peut conclure que notre Univers est le fruit d'un déséquilibre entre matière et antimatière qui a conduit à une très légère surabondance de la première espèce. On ne connaît pas la source de ce phénomène : des différences de comportement entre particules et antiparticules (notamment vis-à-vis de l'interaction faible) sont prédites par le Modèle Standard et observées expérimentalement. Mais elles sont bien trop petites pour expliquer l'asymétrie constatée à l'échelle de l'Univers.

De quoi est fait notre Univers ?

Notre connaissance de l'Univers a progressé de manière considérable depuis un siècle. Nous savons aujourd'hui qu'il est en expansion depuis le Big-bang (qui a eu lieu il y a 13,7 milliards d'années environ) et que sa densité est très proche de la densité critique (cinq atomes d'hydrogène par mètre cube), un paramètre clef pour prévoir l'évolution future de l'Univers. En combinant plusieurs observations indépendantes (rayonnement de fond diffus cosmologique, observation de supernovæ lointaines et des



amas de galaxies), les scientifiques ont montré que la matière ordinaire ne représentait que quelques pourcents du contenu en masse-énergie de l'Univers. Deux autres espèces dominent très largement : la matière noire et plus encore l'énergie noire, responsable d'une accélération du taux d'expansion de l'Univers. Ces deux composantes sont identifiées par leurs propriétés globales (c'est-à-dire leur comportement sous l'effet de la gravitation) mais on ne sait absolument pas de quoi il s'agit en termes de particules et/ou d'interactions.

La nouvelle physique est-elle bien cachée ?

Enfin une question « simple » : la réponse est clairement oui... au grand désespoir des physiciens ! Malgré ses succès continus depuis plus de trois décennies, le Modèle Standard n'est pas parfait. Tout d'abord, il faudrait fixer à très haute énergie les différents paramètres (masses des particules élémentaires, force des interactions) d'une façon extrêmement subtile et apparemment arbitraire afin de retrouver les valeurs extrêmement différentes des paramètres du Modèle Standard aux échelles d'énergie actuellement testées. De plus, de nombreux phénomènes ne sont pas décrits par le Modèle Standard : masses des neutrinos, asymétrie matière-antimatière dans l'Univers, matière noire, énergie noire, gravitation, etc. Il ne fait donc aucun doute qu'il existe une « nouvelle physique » au-delà du Modèle Standard. Par contre, rien ne trahit sa présence dans les expériences actuelles – et donc ni sa nature ni l'échelle d'énergie à laquelle elle se manifesterait. A suivre donc...

7. Des informations complémentaires

Comparaison des intensités des interactions fondamentales à l'échelle subnucléaire

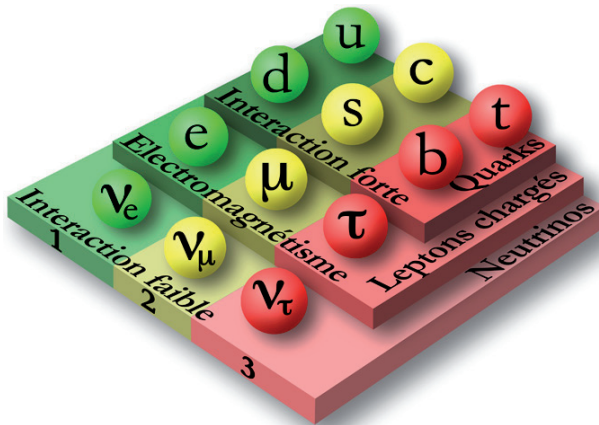
Type	Intensité relative
Interaction forte	~ 1
Interaction électromagnétique	$\sim 10^{-3}$
Interaction faible	$\sim 10^{-5}$
Gravitation	$\sim 10^{-38}$

Le tableau ci-dessus présente un classement par intensité décroissante des interactions fondamentales auxquelles les particules élémentaires sont soumises. Les nombres indiqués dans la seconde colonne sont

relatifs : ils comparent l'intensité d'une force donnée à celle de la force la plus intense (l'interaction forte, au nom bien choisi) fixée à 1 par convention.

Une autre manière de présenter le tableau des composants élémentaires de la matière

Cette image montre une autre manière de présenter les douze particules élémentaires de matière. Chaque famille est d'une couleur différente (totalement arbitraire et simplement présente pour assurer la lisibilité du dessin) et la disposition « en podium » rend compte des sensibilités différentes des particules aux trois interactions fondamentales qui régissent l'infiniment petit.

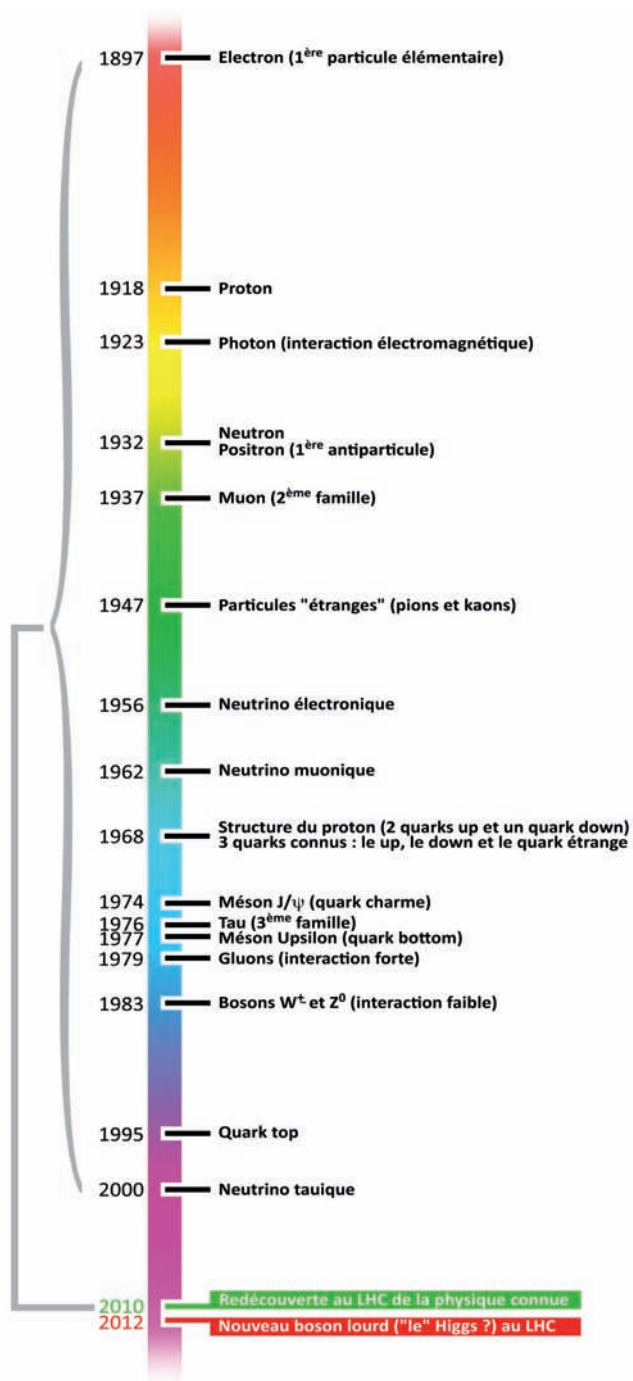


Ainsi, une particule donnée est sensible à toutes les interactions situées « sous elle » :

- seulement l'interaction faible pour les neutrinos ;
- l'interaction faible et l'interaction électromagnétique pour les leptons chargés ;
- l'interaction faible, l'interaction électromagnétique et l'interaction forte pour les quarks.

Chronologie des principales découvertes de particules

- 1895 : les rayons X
- 1896-1898 : la radioactivité naturelle
- 1897 : l'électron



- 1911 : le noyau atomique
- 1918 : le proton
- 1932 : le neutron
- 1932 : le positron (ou antiélectron), première particule d'antimatière
- 1936-1937 : le muon
- 1947-1950 : les pions et les kaons dans les rayons cosmiques
- 1956 : le neutrino électron
- 1962 : le neutrino muon
- 1968 : la structure du proton en terme de quarks
- 1974 : le quark c
- 1975 : le lepton tau
- 1977 : le quark b
- 1979 : les gluons
- 1983 : les bosons W et Z
- 1995 : le quark top
- 2000 : le neutrino tau
- 2012 : le boson de Higgs

Prix Nobel récompensant des avancées scientifiques reliées à la physique des particules

Légende :

- ❖ NC : Prix Nobel de Chimie
- ❖ NM : Prix Nobel de Médecine
- ❖ NP : Prix Nobel de Physique

Code couleurs :

- ❖ avancée théorique
- ❖ résultat expérimental
- ❖ méthode de détection ou application

- 1908, NC : E. Rutherford, désintégration des éléments et chimie des substances radioactives.
- 1911, NC : M. Curie, découverte du radium et du polonium.
- 1914, NP : M. Von Laue, découverte de la diffraction des rayons X par les cristaux.



- 1915, NP : W.H. Bragg & W.L. Bragg (père et fils !), analyse de la structure cristalline au moyen des rayons X.
- 1918, NP : M. Planck, physique des quantas.
- 1921, NP : A. Einstein, physique théorique – en particulier l'effet photélectrique.
- 1922, NP : N. Bohr, mécanique quantique et modèle de l'atome.
- 1923, NP : R. Milikan, charge électrique élémentaire et effet photélectrique.
- 1925, NP : J. Franck & G. Hertz, confirmation du modèle atomique de Bohr.
- 1927, NP : A. Compton, effet Compton ; NP : C.T.R. Wilson, la chambre à brouillard.
- 1929, NP : L. de Broglie, la mécanique ondulatoire.
- 1932, NP : W. Heisenberg, mécanique quantique.
- 1933, NP : E. Schrödinger, mécanique quantique ; NP : P.A.M. Dirac, mécanique quantique relativiste.
- 1935, NP : J. Chadwick, découverte du neutron.
- 1935, NC : F. Joliot-Curie & I. Joliot-Curie, découverte de la radioactivité artificielle.
- 1936, NP : V. Hess, découverte des rayons cosmiques ; NP : C. Anderson, découverte du positron.
- 1938, NP : E. Fermi, travaux sur la radioactivité.
- 1939, NP : E.O. Lawrence, invention du cyclotron.
- 1944, NP : I.I. Rabi, la méthode de la résonance magnétique nucléaire.
- 1945, NP : W. Pauli, principe d'exclusion dit « de Pauli ».
- 1948, NP : P. Blackett, découverte de particules dans les rayons cosmiques.
- 1949, NP : H. Yukawa, théorie des mésons.
- 1950, NP : C. Powell, découverte de particules dans les rayons cosmiques.

- 1951, NP : J. Cockcroft & E. Walton, premiers accélérateurs de particules.
- 1954, NP : M. Born, mécanique quantique.
- 1957, NP : C. Yang & T. Lee, violation de la symétrie de Parité par l'interaction faible.
- 1958, NP : P. Cherenkov, I. Frank & I. Tamm, découverte et interprétation de l'effet Cherenkov.
- 1959, NP : E. Segré & O. Chamberlain, découverte de l'antiproton.
- 1960, NP : D. Glaser, invention de la chambre à bulles.
- 1963, NP : E. Wigner, importance du concept de symétrie.
- 1965, NP : S.I. Tomonaga, J. Schwinger & R. Feynman, l'électrodynamique quantique.
- 1967, NP : H. Bethe, réactions nucléaires dans les étoiles.
- 1968, NP : L. Alvarez, découverte de particules.
- 1969, NP : M. Gell-Mann, le modèle des quarks.
- 1976, NP : B. Richter & S. Ting, découverte du quark charmé.
- 1979, NP : S. Glashow, A. Salam & S. Weinberg, le Modèle Standard électrofaible.
- 1979, NM : A. Cormack & G. Hounsfield, développement de la tomographie.
- 1980, NP : J. Cronin & V. Fitch, violation de la symétrie Charge-Parité dans le secteur des mésons K.
- 1984, NP : C. Rubbia & S. van der Meer, découverte des bosons W et Z.
- 1988, NP : L. Lederman, M. Schwartz & J. Steinberger, découverte du neutrino muon.
- 1990, NP : J. Friedman, H. Kendall & R. Taylor, structure en quarks du proton.
- 1992, NP: J. Charpak, invention de la chambre proportionnelle multifils.
- 1995, NP : M. Perl, découverte du lepton tau ; NP: F. Reines, découverte du neutrino électron.



- 1999, NP : G. t'Hooft & M. Veltman, théorie électrofaible.
- 2002, NP : R. Davis Jr & M. Koshiba, découverte du phénomène d'oscillation des neutrinos.
- 2003, NM : P. Lanterbur & P. Mansfield, découvertes sur l'imagerie par résonance magnétique.
- 2004, NP : D. Gross, H. Politzer & F. Wilcek, théorie de l'interaction forte.
- 2008, NP : Y. Nambu, mécanisme de brisure spontanée de symétrie ; NP : M. Kobayashi & T. Maskawa, mécanisme « CKM » prédisant l'existence d'une troisième famille de quarks pour expliquer les asymétries observées entre particules et antiparticules.
- 2013, NP : F. Englert & P. Higgs, le boson de Higgs.

Table des matières

1. Que représente ce tableau ?	p 2
<i>La frise</i>	<i>p 3</i>
<i>Le tableau des composants élémentaires</i>	<i>p 4</i>
<i>Le Soleil</i>	<i>p 7</i>
<i>L'antimatière</i>	<i>p 7</i>
2. Les interactions fondamentales	p 8
<i>Généralités</i>	<i>p 8</i>
<i>Principales caractéristiques des interactions fondamentales</i>	<i>p 10</i>
3. Quarks et leptons	p 12
<i>Les quarks</i>	<i>p 12</i>
<i>Les leptons</i>	<i>p 15</i>
4. Le boson de Higgs	p 18
5. Quoi de neuf depuis 2005 ?	p 20
6. Quelques questions toujours en suspens	p 23
<i>Pourquoi quatre interactions fondamentales ?</i>	<i>p 23</i>
<i>Pourquoi trois familles ?</i>	<i>p 24</i>
<i>Pourquoi les constituants de la matière et les particules qui véhiculent les interactions ont-elles des masses si disparates ?</i>	<i>p 24</i>
<i>Quelle est la nature des neutrinos ?</i>	<i>p 25</i>
<i>Pourquoi l'antimatière est-elle absente de notre univers ?</i>	<i>p 25</i>
<i>De quoi est fait notre univers ?</i>	<i>p 25</i>
<i>La nouvelle physique est-elle bien cachée ?</i>	<i>p 26</i>
7. Des informations complémentaires	p 26
<i>Comparaison des intensités des interactions fondamentales à l'échelle subnucléaire</i>	<i>p 26</i>
<i>Une autre manière de présenter le tableau des composants élémentaires de la matière</i>	<i>p 27</i>
<i>Chronologie des principales découvertes de particules</i>	<i>p 27</i>
<i>Prix Nobel récompensant des avancées scientifiques reliées à la physique des particules</i>	<i>p 29</i>

