

# Composants élémentaires de la matière

Ce panneau présente les composants élémentaires de la matière et les interactions qui les régissent, elles-mêmes véhiculées par d'autres particules. Ce sont des particules élémentaires sans dimension et sans structure interne connue. Le modèle standard de la physique des particules, élaboré dans les années 1960 et 1970, est le cadre théorique grâce auquel on décrit, de façon unifiée, les phénomènes mettant en jeu ces particules. Il s'appuie d'une part sur la physique quantique, qui décrit 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 ne sont pas négligeables devant celle de la lumière. Moyennant l'introduction d'un certain nombre de paramètres déterminés empiriquement (les paramètres libres du modèle), le modèle standard, fondé sur l'existence d'un petit nombre de particules élémentaires, décrit tous les phénomènes microscopiques connus aujourd'hui.

## 1. Que représente ce tableau ?

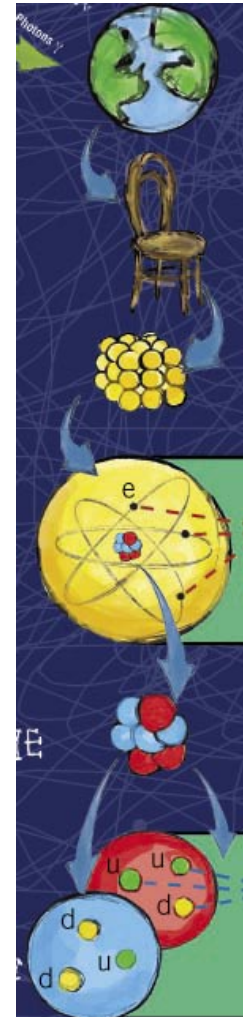
**Composants élémentaires de la matière**

LEPTONS	1 <sup>re</sup> famille			2 <sup>e</sup> famille			3 <sup>e</sup> famille		
	e	$\mu$	$\tau$	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$			
QUARKS	u			c			t		
	d			s			b		

**Les interactions fondamentales**

Interaction	Particules
Interaction forte	g
Interaction électromagnétique	$\gamma$ , $W^\pm$ , $Z^0$
Interaction faible	$W^\pm$ , $Z^0$
Interaction gravitationnelle	$g$

L'information principale contenue dans ce tableau est une classification des composants appelés également particules élémentaires selon leur type, la famille à laquelle ils appartiennent, ou l'interaction qu'elles véhiculent. On y a ajouté une frise illustrant les échelles de grandeurs de différents objets, une brève description du fonctionnement du Soleil et un paragraphe sur l'antimatière.



## La frise

Elle illustre comment on appréhende la matière selon le pouvoir de résolution dont on dispose. À l'échelle macroscopique, celle de tous les jours, on a affaire à des objets de dimensions de l'ordre du mètre. L'astronomie nous donne accès à des objets beaucoup plus massifs et étendus comme les galaxies. La matière « ordinaire » peut être décrite par un agencement de molécules formées d'atomes. L'ordre de grandeur d'un atome est de  $10^{-10}$  m. La quasi totalité de la masse de l'atome est concentrée dans son noyau, de rayon  $10^{-15}$  m. Le noyau est lui-même composé de nucléons (protons et neutrons). Ces derniers ne sont pas élémentaires, puisqu'on sait depuis les années 60 qu'ils sont eux-mêmes « composés » de particules ponctuelles, les quarks et les gluons.

## Le tableau des composants élémentaires

Les particules élémentaires sont caractérisées par leur masse, leur charge électrique et leur spin. Le spin est une propriété intrinsèque des particules qui est analogue mais pas identique au concept de « rotation sur soi-même » et qui lui confère des propriétés semblables à celle d'un petit aimant. Les particules de spin entier sont appelées bosons (du nom du physicien indien Satyendranath Bose), alors que celles de spin demi-entier sont des fermions (du nom du physicien italien Enrico Fermi). Les fermions obéissent au principe d'exclusion de Pauli suivant lequel deux fermions identiques ne peuvent exister dans le même état quantique. Ceci explique pourquoi les électrons sont disposés en couches autour du noyau et ne tombent pas tous dans l'état fondamental. Par contre, il n'y a aucune restriction sur le nombre de bosons dans le même état quantique. Ainsi, le phénomène des lasers est-il dû à un ensemble de photons dans le même état.

En physique des particules, on distingue les champs (ou particules) de matière et les champs d'interaction. Les particules de matière de la première table interagissent entre elles en « échangeant » des champs d'interaction qui sont décrits dans l'autre table. Elles sont classées en trois « familles » dont seule la première constitue la matière ordinaire. Les deux autres familles ont été découvertes dans les rayons cosmiques et dans

des expériences réalisées auprès d'accélérateurs de très haute énergie. On distingue les quarks des leptons car ils ne sont pas tous sensibles aux mêmes interactions. Les quarks et les leptons sont des fermions.

L'ensemble des phénomènes physiques qui gouvernent l'Univers peut être décrit par quatre interactions (ou forces) fondamentales. Au niveau subatomique, elles sont caractérisées par les particules échangées au cours d'une interaction, particules que l'on retrouve dans les quatre cases dans le tableau des interactions ; ce sont des bosons.

## Le Soleil



Le fonctionnement du Soleil fait appel aux quatre interactions fondamentales ; il fournit un bon exemple qui fait appel à des phénomènes différents de ceux rencontrés dans la vie quotidienne. 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 et pour amorcer la réaction primordiale de fusion de deux protons en deuteron (p-n). 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 mis à l'œuvre dans les chaînes de réactions nucléaires qui suivent et qui produisent d'autres noyaux. 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



Si notre Univers semble entièrement fait de matière, nous savons qu'à chaque particule de matière correspond une particule d'antimatière dont les propriétés sont les mêmes mais dont les « charges » sont

opposées. C'est ainsi qu'à côté du tableau des quarks et leptons, on pourrait mettre celui des antiquarks et antileptons. Néanmoins, nous savons maintenant qu'il n'y a pas d'antimatière dans l'Univers. Celle que nous connaissons provient de réactions entre particules élémentaires produites par les rayons cosmiques ou grâce à des accélérateurs. La première antiparticule, l'antiélectron, ou positon, fut découverte dès 1932.

## 2. Les interactions fondamentales

Des quatre interactions fondamentales, deux nous sont connues par l'expérience quotidienne et ont été l'objet d'étude de la physique « classique » : ce sont la gravitation et la force électromagnétique. Ces forces ont en commun d'être de portée infinie et inversement proportionnelles au carré des distances. En théorie quantique, ceci implique que les particules véhiculant ces interactions sont de masse rigoureusement nulle ; il s'agit du photon pour l'électromagnétisme, et du graviton, dont l'existence est encore hypothétique, pour la gravitation. Celle-ci pose néanmoins problème car on ne sait pas encore la traiter dans le formalisme de la théorie quantique des champs utilisée avec succès pour les trois autres interactions : la relativité générale et la mécanique quantique ont bien du mal à faire bon ménage. Ceci ne met pas toutefois en cause la physique des particules car la gravitation y joue un rôle mineur du fait de sa très faible intensité. Elle est donc tout simplement négligée au niveau subatomique.

<p><b>Gravitation</b> Attraction universelle, planètes, galaxies. <b>GRAVITON</b></p>
<p><b>Interaction faible</b> Désintégrations radioactives. <math>Z^0, W^+, W^-</math></p>
<p><b>Interaction électromagnétique</b> Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. <b>PHOTON</b></p>
<p><b>Interaction forte</b> Cohésion des protons et des noyaux. <b>GLUON</b></p>

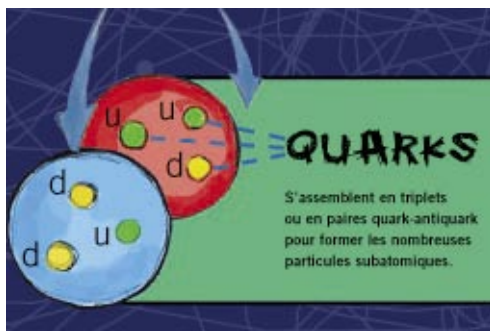
Les deux autres forces, l'interaction forte et l'interaction faible n'ont été mises en évidence qu'au XX<sup>e</sup> siècle par l'étude des noyaux.

Pour expliquer que des protons et des neutrons puissent être liés dans un noyau, il a fallu faire appel à une force plus forte que la force coulombienne qui tend à séparer les protons les uns des autres et n'agit pas sur les neutrons de charge 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 au cours du dernier demi-siècle ne sont pas réellement « élémentaires ». Elles sont formées de quarks interagissant entre eux en échangeant des gluons qui les « collent » entre eux. Les gluons, qui ont été mis en évidence en 1979, sont de masse nulle ; cependant l'interaction forte reste de portée très petite, ce qui explique qu'on ne puisse l'observer à l'échelle classique ou même atomique.

La quatrième interaction est la force faible dont un des aspects est de gouverner les désintégrations de type bêta des particules élémentaires et des noyaux. Elle est aussi une force à portée subatomique à cause des masses élevées des vecteurs qui la véhiculent : les bosons intermédiaires W et Z, plus de 80 fois plus massifs qu'un proton ! Ces bosons ont été vus pour la première fois au Cern (grand laboratoire de recherche européen à Genève) en 1984. Au point de vue macroscopique, la force faible se manifeste dans la combustion thermonucléaire des étoiles dont elle régit la phase initiale où deux protons fusionnent pour donner un noyau de deutérium (un proton et un neutron liés), un électron et un neutrino. La combustion se continue par des réactions nucléaires où l'interaction forte intervient à son tour.

Un des grands succès de la physique des particules a été d'unifier dans un même formalisme l'interaction faible et l'électromagnétisme qui apparaissent comme deux aspects d'une même force. Ce succès théorique a été couronné expérimentalement par la découverte des particules Z et W et par l'étude de leurs propriétés.

### 3. Les quarks et les leptons



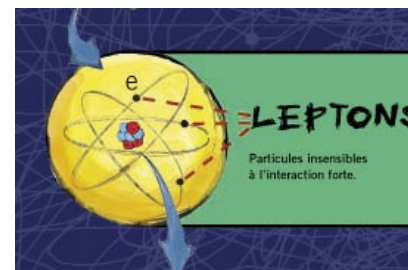
#### Les quarks

Les quarks sont les composants des nucléons — qui forment l'essentiel de la matière « ordinaire » — et plus généralement des particules qu'on appelle hadrons. Il en existe six espèces ou « saveurs » : on distingue les quarks up (u), down (d), charmé (c), étrange (s), top (t), bottom ou beau (b). Ces noms sont historiques : les quarks up et down ont des propriétés similaires reliées par une symétrie dont le formalisme est le même que celui qui décrit une particule de spin ; le quark étrange tire son nom des caractéristiques « étranges » qu'avaient à l'époque de leur découverte dans les années 50 les particules qui le contenaient ; le quark charmé, découvert en 1975, a été introduit d'abord théoriquement pour expliquer l'absence de certains phénomènes qu'il faisait disparaître comme par enchantement, et les top et bottom (découverts en 1977 et 1995) ont été nommés ainsi par analogie avec les quarks u et d — le b est aussi appelé quark beau.

Les quarks sont sensibles aux interactions forte et faible, et à la force électromagnétique ; leur charge électrique est fractionnaire ( $1/3 q_e$ ,  $-2/3 q_e$ ) (où  $q_e$  est la charge électrique de l'électron de valeur absolue  $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb) et ils n'existent pas à l'état libre car ils restent « confinés » dans les particules qu'ils constituent. Pour des raisons liées à des lois d'invariance et de symétrie des interactions forte et faible, ils sont classés en trois familles. La première famille est constituée des quarks up et down. Le proton est ainsi un état de trois quarks (uud) et le neutron un état de trois quarks (udd). Les autres familles sont des répliques de la précédente et sont formées de quarks instables qui se désintègrent par interaction faible en quarks plus légers et en leptons avec une durée de vie très courte, inférieure à  $10^{-10}$  s. Les masses des quarks sont très disparates : le plus lourd, le t, est environ 180 fois plus lourd qu'un proton, lui-même constitué de trois quarks légers...

Enfin, les quarks portent une charge de couleur (il y en a trois), non indiquée sur le tableau et qui est à l'interaction forte ce qu'est la charge électrique pour la force électromagnétique.

Il existe des centaines de particules que l'on appelle les hadrons. Tout hadron est, soit un assemblage de trois quarks, soit une paire formée d'un quark et d'un antiquark. De fait, à chaque assemblage ainsi constitué, correspond une particule. Les hadrons de la première catégorie, qui comprend notamment le proton et le neutron, s'appellent des baryons. Les autres s'appellent des mésons.



#### Les leptons

Ce sont des particules de matière sensibles à l'interaction faible mais non à l'interaction forte. L'électron (e) et son compagnon le neutrino électronique ( $\nu_e$ ) forment la première famille. Les autres répliques sont celle du muon ( $\mu$ ), découvert en 1937 dans les rayons cosmiques, et celle du tau ( $\nu_\tau$ ) (1976) et de leur neutrino associé. Les électrons, muons et taus sont des «

cousins » de charge élémentaire  $q_e$  et ont des propriétés analogues, malgré des masses fort différentes et des « saveurs » distinctes. Comme les quarks des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> familles, le  $\mu$  et le  $\tau$  sont instables et se désintègrent en particules plus légères.

Les neutrinos sont électriquement neutres et interagissent très peu avec la matière : un neutrino peut traverser toute la Galaxie sans subir aucune interaction... Difficiles à détecter, ils sont abondamment produits par la combustion des étoiles.

Les neutrinos, dont l'existence avait été postulé dans les années 30 pour expliquer la

désintégration bêta, ont effectivement été découverts au nombre de trois : le neutrino électronique ( $\nu_e$ ) en 1956, le neutrino mu ( $\nu_\mu$ ) en 1964 et le neutrino tauonique ( $\nu_\tau$ ) en 2000. On a longtemps pensé qu'ils avaient une masse rigoureusement nulle, mais des résultats expérimentaux des dernières années indiquent qu'il « oscillent » durant leur course, passant d'une saveur à une autre. Ceci a pour conséquence inéluctable qu'ils doivent avoir des masses légèrement différentes, ce qui exclue bien sûr l'hypothèse de neutrinos sans masse.

## 4. Quelques questions en suspens

Malgré l'apparente simplicité du tableau des particules, de nombreux mystères restent à élucider. En se restreignant à notre tableau, on peut se poser les questions suivantes



### Pourquoi quatre interactions ?

Nous n'en savons rien... mais nous rêvons d'unifier tous les processus élémentaires en les faisant découler d'une seule interaction, comme l'a fait Maxwell pour l'électricité et le magnétisme.

### Pourquoi trois familles ?

Là aussi, il n'y a pas encore de réponse. On sait simplement que des « répliques » des constituants de la matière ordinaire existent, et que jusqu'à présent elles sont trois...

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

D'après le modèle standard de la physique des particules, ces valeurs sont liées aux propriétés du fameux boson de Higgs, avidement recherché pendant plus de 15 ans au Cern (près de Genève), puis au Fermilab (près de Chicago) grâce à un collisionneur

proton-antiproton appelé le Tevatron, et demain (à partir de 2007), auprès d'un gigantesque collisionneur de protons actuellement en construction au Cern, le LHC.

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

Tout de suite après le Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière qui auraient dû s'annihiler complètement. Notre Univers n'est donc que le fruit d'un petit déséquilibre qui a mené à une très légère surabondance de matière. On ne connaît pas vraiment la source de ce déséquilibre, mais l'étude de l'interaction faible dans certains de ses aspects les plus subtils permettra sûrement d'y voir plus clair.

