

Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

Vous restez imperméable à la physique ? La matière vous semble une notion abstraite et complexe ? Et pourtant, saviez-vous que les nucléons (qui forment le noyau des atomes) sont au nombre de 3.10^{27} dans 1 m³ d'air ? Ou 10^{24} dans un livre ? Comment, donc, passer à côté ? Partez à la découverte de tous les rudiments de la physique, expliqués simplement.



La physique, la matière, des notions complexes abordées ici simplement. © DR



Lors du Big Bang, les protons, neutrons et électrons se sont combinés pour former les atomes simples. © Seven Portraits nc 30

De quoi est faite la matière ?

Ce dossier est destiné à explorer la structure de la matière en partant des atomes et en allant jusqu'aux particules fondamentales. Il vous permettra de comprendre de quoi est composée la matière, ce que sont exactement les atomes, fermions et nucléons dont on parle tant. Vous pourrez également découvrir la radioactivité (artificielle et naturelle) et les principes du fameux modèle standard.

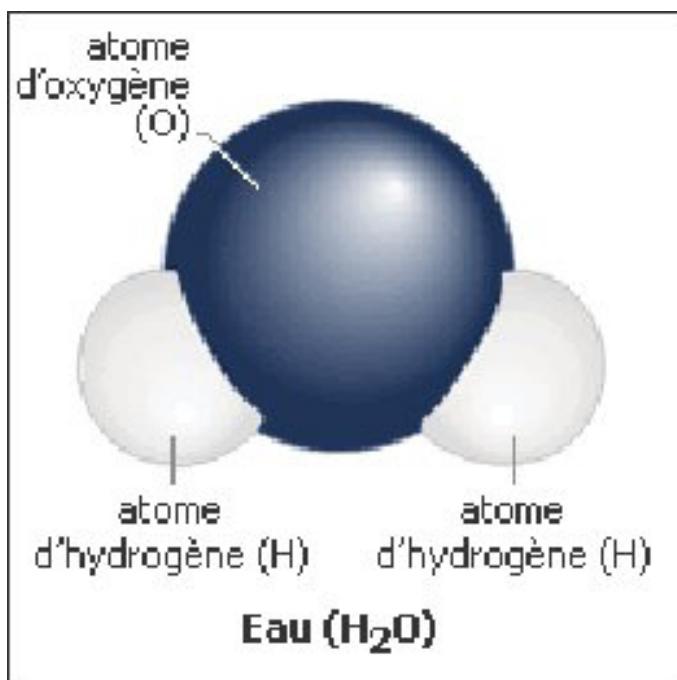
Dossier réalisé par David Calvet chargé de recherche au CNRS (*physique des particules expérimentale*).

La notion de matière peut paraître complexe. Et pourtant les éléments essentiels (atome, molécule, antimatière...) sont simples à comprendre. En voici la preuve !

Si l'on prend un morceau de fer et qu'on le divise en morceaux de plus en plus petits, il arrivera un moment où il ne sera plus possible de le diviser. Ce plus petit morceau de fer possible est l'atome de fer. Un atome de fer peut être divisé mais les morceaux qui restent après la division ne sont plus du fer (on obtient un noyau et des électrons)...

Si l'on prend de l'eau et qu'on la divise en parties de plus en plus petites, il arrivera aussi un moment où il ne sera plus possible de la diviser. La plus petite partie d'eau possible est la molécule d'eau. La molécule d'eau peut être divisée mais les parties restantes après la division ne sont plus de l'eau : ce sont un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène (la molécule d'eau est donc notée H₂O)...

Ainsi, il est possible de faire de l'[eau](#) avec de l'oxygène et de l'hydrogène, au cours d'une réaction chimique. Par contre, il n'est pas possible de faire du fer par une réaction chimique (mais il est possible d'extraire du fer d'une molécule qui en contient).



Molécule d'eau. © DR

Une molécule est donc un assemblage de plusieurs atomes. Certains corps, tels que l'eau, sont des corps composés, leur plus petite partie est une molécule, d'autres, comme le fer, sont des corps purs, leur plus petite partie est un atome. La chimie permet de faire des corps composés à partir de corps purs, mais pas de faire des corps purs à partir d'autres corps purs...

Un peu d'histoire...

Les Grecs anciens, et en particulier Démocrite, avaient déjà imaginé que la matière devait être discrète et non continue, c'est-à-dire qu'elle ne peut pas être divisée indéfiniment. Ils avaient ainsi postulé l'existence de grains de matière indivisibles qu'ils

appelèrent atomes (*atomos* en grec signifie inséparable). Néanmoins, pendant des siècles, l'idée généralement admise était que toute matière pouvait être formée à partir de quatre éléments fondamentaux : l'eau, l'[air](#), la terre et le feu...

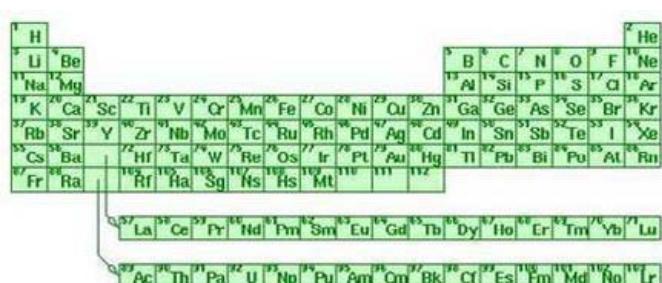
Les notions modernes d'éléments et d'atomes sont apparues plus tard avec les débuts de la chimie. La notion d'élément telle qu'elle est connue actuellement a été définie en 1661 par Robert Boyle. Ensuite, John Dalton en 1808 et [Avogadro](#) en 1811 élaborèrent la notion d'atome et de molécule afin d'expliquer les réactions chimiques, mais ce schéma ne fut adopté officiellement qu'en 1860.

Il fallut attendre la fin du XIX^e siècle pour que l'atome soit aussi étudié par les physiciens et pas seulement par les chimistes.

Qu'est-ce que le nombre atomique ?

Le nombre atomique est ce qui permet de différencier les atomes entre eux, il est égal au nombre d'électrons ou de protons contenus dans cet atome.

Par exemple, le nombre atomique du fer est 26, celui de l'oxygène est 8 et celui de l'hydrogène est 1. Ce nombre permet de ranger les atomes dans une table, appelée table périodique des éléments :



Symbol	Name	Atomic Number
H	Hydrogen	1
He	Helium	2
Li	Lithium	3
B	Boron	5
Be	Beryllium	4
C	Carbon	6
N	Nitrogen	7
O	Oxygen	8
F	Fluorine	9
Ne	Neon	10
Na	Sodium	11
Al	Aluminum	13
Mg	Magnesium	12
Si	Silicon	14
P	Phosphorus	15
S	Sulfur	16
Cl	Chlorine	17
Ar	Argon	18
K	Potassium	19
Ca	Calcium	20
Sc	Scorbium	21
Tl	Thallium	23
V	Vanadium	23
Cr	Chromium	24
Mn	Manganese	25
Fe	Iron	26
Co	Cobalt	27
Ni	Nickel	28
Cu	Copper	29
Zn	Zinc	30
Ga	Gallium	31
Ge	Germanium	32
As	Antimony	33
Se	Selenium	34
Br	Bromine	35
Kr	Krypton	36
Rb	Rubidium	37
Sr	Samarium	38
Y	Yttrium	39
Zr	Zirconium	40
Nb	Niobium	41
Mo	Molybdenum	42
Tc	Technetium	43
Ru	Ruthenium	44
Rh	Rhenium	45
Pd	Palladium	46
Ag	Argent	47
Cd	Cadmium	48
In	Inium	49
Sn	Tin	50
Sb	Sbium	51
Te	Tellurium	52
I	Iodine	53
Xe	Xenon	54
Cs	Cesium	55
Ba	Barium	56
Hf	Hafnium	72
Ta	Tantalum	73
W	Tungsten	74
Re	Rhenium	75
Os	Osmium	76
Ir	Iridium	77
Pt	Ptanium	78
Al	Alanium	79
Hg	Mercury	80
Tl	Thallium	81
Pb	Lead	82
Bi	Bismuth	83
Pu	Plutonium	94
Am	Americium	95
Cm	Cerium	96
Bk	Berkelium	97
Cf	Cfetium	98
Es	Einsteinium	99
Fm	Fermium	100
Md	Mendelevium	101
No	Noberium	102
Lu	Lutetium	103
La	Lanthanum	57
Ce	Cerium	58
Pr	Praseodymium	59
Hd	Holmium	60
Pm	Promethium	61
Sm	Samarium	62
Eu	Europium	63
Gd	Gadolinium	64
Tb	Terbium	65
Dy	Dysprosium	66
Ho	Holmium	67
Er	Erbium	68
Tm	Thulium	69
Yb	Ytterbium	70
Lu	Lutetium	71
Ac	Actinium	89
Th	Thorium	90
Pa	Protactinium	91
U	Uranium	92
Np	Neptunium	93
Pu	Plutonium	94
Am	Americium	95
Cm	Cerium	96
Bk	Berkelium	97
Cf	Cfetium	98
Es	Einsteinium	99
Fm	Fermium	100
Md	Mendelevium	101
No	Noberium	102
Lu	Lutetium	103

La table périodique des éléments. Chaque case correspond à un atome différent avec son symbole (Fe pour fer, O pour oxygène, H pour hydrogène...) et son nombre atomique. © DR



Combien y a-t-il d'atomes différents ?

En principe, il y a une infinité d'atomes différents, puisque le nombre atomique peut varier de 1 à l'infini ! En pratique, le nombre d'atomes connus actuellement est d'environ 112, les plus répandus sont ceux qui ont un nombre atomique faible, en particulier, l'hydrogène est le corps le plus abondant (75 % des atomes) dans l'univers. La plupart des atomes de nombre atomique élevé ont été créés par [réactions nucléaires](#) et se désintègrent très rapidement, on ne peut donc pas les trouver dans la nature...

Comment sont créés les éléments ?

Les divers éléments qui existent dans la nature n'ont pas été créés au début de l'[univers](#) mais sont principalement créés dans les [étoiles](#).

Lors du Big Bang (le début de l'univers), les protons, neutrons et électrons se sont combinés pour former les atomes simples, essentiellement l'hydrogène et l'[hélium](#), mais aussi en plus faible quantité le lithium, le beryllium et le bore.

À partir de cette matière primordiale, les [premières étoiles](#) se forment, essentiellement constituées d'hydrogène. Grâce à la [fusion nucléaire](#) la plupart des atomes plus lourds (jusqu'au fer) sont alors créés au sein des étoiles. Les atomes plus lourds que le fer seraient créés lors de l'explosion de certaines étoiles, les [supernovae](#).

Ainsi, le [Soleil](#) et son système planétaire dont nous faisons partie ne peuvent avoir été formés qu'à partir d'atomes qui ont été synthétisés dans des étoiles maintenant mortes.

La Terre et tout ce qui s'y trouve, en particulier les êtres vivants, sont donc constitués de poussière d'étoiles...

Peut-on transformer le plomb en or ?

Le rêve des [alchimistes](#) de transformer le plomb en or est en effet possible en réalisant des réactions nucléaires, capables de transformer un noyau de plomb en un noyau d'or. Mais, la quantité d'or ainsi produite est tellement faible par rapport à l'énergie nécessaire que ces réactions ne présentent aucun intérêt...

Qu'est-ce que l'antimatière ?

L'antimatière est constituée d'[antiparticules](#). Une antiparticule a exactement la même masse que la particule correspondante mais des [nombres quantiques](#) opposés. Par exemple, l'anti-électron a une charge électrique positive et de même amplitude que celle de l'électron. En combinant des [antiprotons](#), des antineutrons et des antiélectrons, il est possible de faire des anti-atomes. Des atomes d'antihydrogène ont déjà été produits.

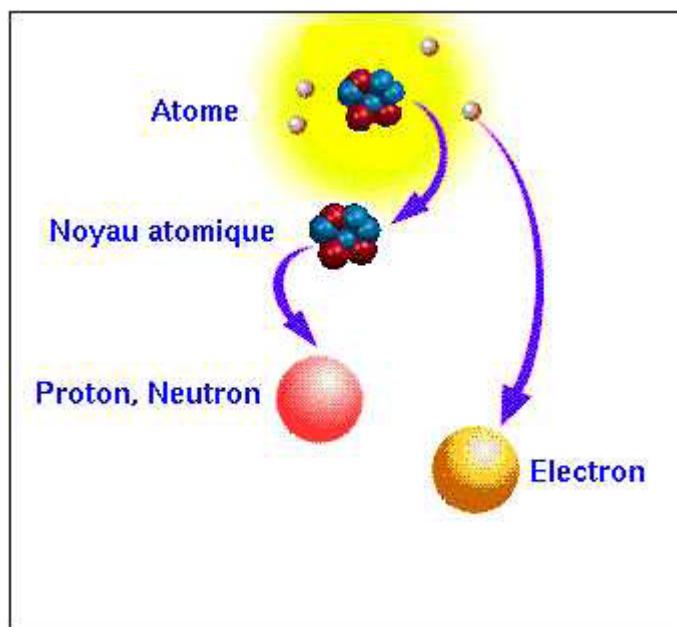
Lorsqu'une particule de matière rencontre son antiparticule, elles s'annihilent mutuellement en libérant la totalité de leur énergie sous forme de rayonnement. Les collisions particule-antiparticule sont couramment utilisées dans les expériences de physique des particules.

La durée de vie de l'antimatière dans notre environnement est très faible puisqu'elle rencontre rapidement de la matière et s'annihile alors. Il n'y a donc pas d'[antimatière](#) sur Terre ou dans le [Système solaire](#) ni même dans notre [galaxie](#). Il semble même qu'il n'y ait nulle part dans l'univers d'anti-matière en quantité importante, pouvant par exemple former des étoiles d'anti-matière. Or, la matière et l'antimatière sont supposées avoir été créées en quantités égales lors du Big Bang. Le fait que toute l'antimatière ait disparu est un phénomène inexpliqué pour l'instant.



La première antiparticule, l'antiélectron, a été découverte en 1933 à l'aide des [rayons cosmiques](#). En effet, les particules du rayonnement cosmique interagissent avec l'[atmosphère](#) et peuvent alors créer des antiparticules.

Intéressons-nous à l'atome. De quoi est-il fait ? Quelle est sa forme ? Quelle est sa masse ?



Constitution d'un atome (échelle non respectée). © DR

De quoi est fait un atome ?

Un atome contient un noyau situé en son centre et des [électrons](#) qui « tournent » autour du noyau. Le noyau contient des [nucléons](#), c'est-à-dire des [protons](#) et des [neutrons](#).

Les électrons ont une charge électrique négative. Les protons ont une charge électrique positive, de même valeur que celle de l'électron. Les neutrons n'ont pas de charge électrique, ils sont neutres.

Il y a exactement le même nombre d'électrons et de protons dans un atome, un atome est donc électriquement neutre. Le nombre d'[électrons](#) (ou de

protons) dans un atome détermine ses propriétés physiques et chimiques, c'est le nombre atomique. Par exemple, un atome d'hydrogène a 1 électron et 1 proton, le nombre atomique d'un atome de [carbone](#) est 6, celui d'un atome d'oxygène 8, d'un atome de [fer](#) 26, d'un atome d'[uranium](#) 92, etc. (voir la table des éléments)

Le nombre de neutrons dans un atome est variable, en général il est proche du nombre de protons. Deux atomes de même nombre atomique mais ayant un nombre de neutrons différents sont des [isotopes](#) : leurs propriétés chimiques sont identiques mais leurs propriétés physiques sont différentes (par exemple, certains isotopes d'atomes stables sont radioactifs). Pour différencier les isotopes entre eux, on donne en général le nombre de nucléons avec le nom de l'atome. Par exemple, l'uranium 235 contient 92 protons et 143 neutrons ($235=92+143$) et l'uranium 238 contient 92 protons et 146 neutrons ($238=92+146$).

Un peu d'histoire

Notre connaissance des [atomes](#) est très récente. En effet, la structure des atomes était totalement inconnue en 1895 ! C'est la découverte des [rayons X](#) par Röntgen en 1895 puis de la [radioactivité](#) par [Henri Becquerel](#) en 1896 et Pierre et [Marie Curie](#) à partir de 1898 qui a permis de commencer à comprendre la structure des atomes.

Les électrons ont été identifiés par J.-J. Thomson en 1897, puis, en 1911, Ernest Rutherford découvre l'existence du noyau atomique. Cependant, pendant plusieurs années, les physiciens pensaient que le noyau était formé de protons et d'électrons. Dans le même temps, pendant les années 1924-1927, le développement de la [mécanique quantique](#) permet de décrire de manière précise le comportement des électrons des atomes. Seul le noyau restait incompris...

En 1931, Irène et [Frédéric Joliot-Curie](#) observent les neutrons mais sans comprendre leur nature.



En 1932, James Chadwick montre que le neutron est un partenaire neutre du proton. La structure de l'atome est comprise...

Qu'est-ce qui lie les électrons au noyau ?

Les électrons et le noyau d'un atome sont liés par l'interaction électromagnétique. En effet, le noyau atomique a une charge électrique positive, grâce aux protons, alors que les électrons ont une charge électrique négative. Ainsi, parce que leurs charges électriques sont opposées, le noyau atomique et les électrons s'attirent, ce qui permet aux atomes de ne pas perdre leurs électrons.

Lorsque deux atomes sont suffisamment proches l'un de l'autre, ils peuvent échanger certains de leurs électrons, cet échange permet alors de lier ces deux atomes en un objet composite qui est une molécule. Ce processus est une réaction chimique.

Que signifie le mot atome ?

Le mot atome vient du grec *atomos* qui signifie indivisible, insécable. Il convenait donc parfaitement au concept d'atome lorsqu'il a été élaboré par les chimistes au début du XIX^e siècle, c'est à dire comme la plus petite partie d'un corps pur.

Maintenant, on sait que les atomes ne sont pas indivisibles, qu'on peut en arracher des électrons, fissionner leur noyau, etc. Mais le nom est resté !

Qu'est-ce qu'un ion ?

Un ion est un atome ou une molécule dont on a enlevé ou ajouté un ou plusieurs électrons. Ainsi, un atome ou une molécule étant toujours électriquement neutre, un ion est soit positif soit négatif. Un ion a donc des propriétés physicochimiques différentes de la molécule dont il provient. Un ion positif est appelé un cation et un ion négatif est appelé un anion.

L'ionisation de la matière consiste à arracher des électrons aux atomes. La grande majorité des systèmes de détection des particules est basée sur l'ionisation.

Quelle est la taille d'un atome ?

Un atome a une taille de l'ordre de 10^{-10} m, soit un dixième de millionième de millimètre ! Un noyau d'atome a une taille de l'ordre de 10^{-15} m, soit cent mille fois plus petit que l'atome lui-même !

Un électron est théoriquement une particule ponctuelle, elle ne doit donc pas avoir de taille... En tout cas, si l'électron a une taille, elle est inférieure à 10^{-18} m, soit au moins cent millions de fois plus petit que l'atome !

Un atome est donc très petit : il y a onze milliards de milliards d'atomes de fer dans un milligramme de fer !

Quelle est la masse d'un atome ?

La masse d'un nucléon est de $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg, soit moins de deux millièmes de milliardième de milliardième de milligramme ! Les protons et les neutrons ont quasiment la même masse.

La masse d'un électron est de $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, soit 1.836 fois moins qu'un nucléon !

Ainsi, 99,97 % de la masse d'un atome est dans son noyau !

Comme le noyau est très petit, la masse d'un atome est donc très concentrée. Ainsi, si on supprimait le vide qu'il y a autour des noyaux des atomes, la Terre pourrait tenir dans une sphère de seulement 150 m de rayon !

À quoi ressemble un atome ?

Si on grossit mille milliards de fois un atome d'hydrogène :



- le noyau est constitué d'un seul proton, il a une taille de 1 millimètre et a une masse de 1,7 million de tonnes !
- l'unique électron a une taille inférieure à 1 micron (un millième de millimètre) et a une masse de 900 tonnes !
- cet électron « tourne » autour du noyau dans un volume d'environ 100 m de diamètre, c'est la taille de cet atome d'hydrogène, tout le reste est vide !

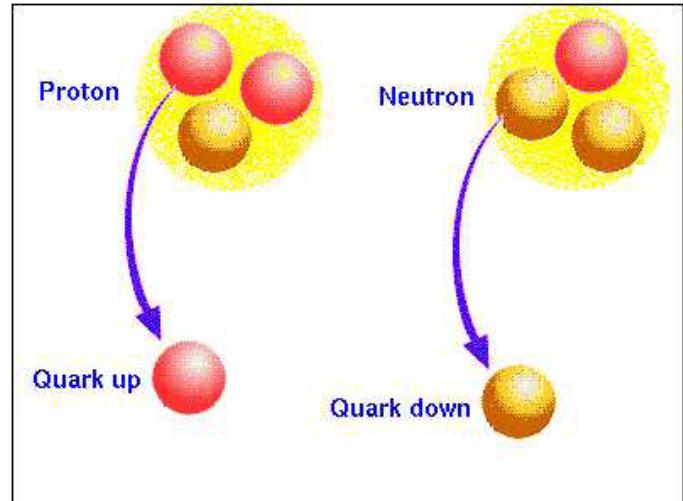
Un atome est-il vide ?

Le volume du noyau est un million de milliards de fois plus petit que celui de l'atome. Le volume de l'atome est donc défini comme le volume dans lequel on a une chance non négligeable de trouver un des électrons de cet atome.

Le volume de l'atome est donc constitué d'au moins 99,999999999999 % de vide !

En théorie, les particules qui forment les protons et les neutrons (les quarks) sont, tout comme l'électron, des particules ponctuelles, c'est-à-dire des particules sans volume. En théorie, un atome est donc constitué de 100 % de vide ! Il n'est bien sûr pas possible de prouver que c'est vrai...

Un nucléon est le constituant du noyau atomique. Il y a deux sortes de nucléons : les protons qui ont une charge électrique positive, et les neutrons qui n'ont pas de charge électrique (ils sont électriquement neutres). Mais de quoi est fait un nucléon ? Quelle est sa masse, sa taille ?



Un nucléon est constitué de quarks up et de quarks down. © DR

De quoi est fait un nucléon ?

Un nucléon est un objet composite très complexe. Dans la vision la plus simple, on peut dire que les nucléons sont constitués de différents quarks :

- les *quarks up* (notés u), de charge électrique +2/3 de la charge d'un électron ;
- les *quarks down* (notés d), de charge électrique -1/3 de la charge d'un électron.

Ainsi, le proton est constitué de deux quarks up et d'un quark down (uud), sa charge électrique est donc +1 (=+2/3+2/3-1/3). Le neutron est constitué d'un quark up et de deux quarks down (udd), sa charge électrique est donc 0 (=+2/3-1/3-1/3).

Un peu d'histoire

Lorsque les protons et les neutrons furent découverts (entre 1911 et 1932), les physiciens pensaient que ces particules étaient élémentaires, c'est à dire qu'elles étaient indivisibles, qu'elles n'avaient pas de structure interne.

Il fallut attendre les années 1967-70 pour que Bjorken et Feynman imaginent la présence d'une structure dans les nucléons, les quarks. Mais, comme il

Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

est théoriquement impossible d'observer un quark libre, ce n'est qu'en 1975 que l'existence des quarks fut prouvée expérimentalement.

Qu'est-ce qui lie les quarks entre eux ?

Les quarks d'un proton ou d'un neutron sont liés par l'interaction forte.

Cette interaction, en plus de lier les quarks entre eux au sein d'un nucléon, permet aussi aux nucléons de s'attirer pour former un noyau atomique. En effet, les protons ayant tous la même charge électrique, ils se repoussent par l'interaction électromagnétique. Heureusement, cette dernière est beaucoup plus faible que l'interaction forte, qui attire les nucléons entre eux, et permet donc aux noyaux atomiques de rester stables. De plus, les neutrons étant totalement insensibles à l'interaction électromagnétique (leur charge électrique est nulle), ils ne peuvent être liés à l'atome que par l'interaction forte.

Quelle est la taille d'un nucléon ?

La taille d'un nucléon est environ 10^{-15} m, soit un millionième de millionième de millimètre ! Un quark est théoriquement une particule ponctuelle, elle ne doit donc pas avoir de taille... En tout cas, si les quarks ont une taille, elle est inférieure à 10^{-18} m, soit au moins mille fois plus petit que le nucléon !

Quelle est la masse d'un nucléon ?

La masse d'un nucléon est environ de $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg, soit moins de deux millièmes de milliardième de milliardième de milligramme ! Les protons et les neutrons ont quasiment la même masse : celle du proton est de $1,673 \cdot 10^{-27}$ kg, celle du neutron est de $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg.

Bien que leur masse soit très petite, les nucléons constituent 99,97 % de la masse de la matière !

Un fermion élémentaire est une particule qui forme la matière, comme les électrons ou les quarks. Les fermions élémentaires sont séparés en deux catégories : les leptons et les quarks. Voici tout ce qu'il faut savoir sur ces éléments.

Qu'est-ce qu'un fermion élémentaire ?

Dans « fermion élémentaire », il y a d'abord **fermion**... Un fermion est une particule de spin demi-entier, en pratique tous les fermions élémentaires ont un spin 1/2 (le spin est une propriété quantique de la matière assez étrange). Les fermions ont la propriété suivante : si on prend une boîte et qu'on y met des fermions, il arrivera un moment où elle sera pleine et il ne sera alors plus possible d'en ajouter... La matière ne peut donc pas être comprimée à l'infini (alors qu'il y aurait toujours de la place dans la boîte pour des bosons, qui sont les particules de spin entier).

Dans « fermion élémentaire », il y a aussi **élémentaire**... Une particule élémentaire est une particule qui ne contient aucune sous-structure : elle ne peut pas être divisée. Expérimentalement, la taille d'un fermion élémentaire n'a jamais pu être mesurée, en tout cas elle doit être inférieure à 10^{-18} m, soit inférieure à un millionième de milliardième de millimètre ! Théoriquement, un fermion élémentaire est une particule ponctuelle, c'est-à-dire une particule sans volume donc sans taille.

Les fermions élémentaires sont séparés en deux catégories : les leptons (comme l'électron ou le neutrino) et les quarks.

Qu'est-ce qu'un lepton ?

Un lepton est un fermion élémentaire qui n'est pas sensible à l'interaction forte, il n'est donc sensible qu'à l'interaction faible et éventuellement l'interaction électromagnétique.

Les deux leptons les plus connus sont l'électron et le neutrino.



Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

Comme le neutrino est électriquement neutre, il n'est sensible qu'à l'interaction faible. Ainsi, les neutrinos interagissent extrêmement peu avec la matière, ils sont donc très difficiles à détecter. Les neutrinos peuvent facilement traverser la Terre sans subir le moindre choc.

Vous êtes traversé par environ 400.000 milliards de neutrinos par seconde (qui viennent presque tous du [Soleil](#)), sans que cela ait le moindre effet sur vous (heureusement) !

Qu'est-ce qu'un quark ?

Un quark est un fermion élémentaire qui est sensible à toutes les interactions : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et aussi l'interaction forte. Les [quarks](#) sont les constituants des [nucléons](#), qui constituent le noyau atomique.

La matière ordinaire

La matière ordinaire, c'est-à-dire celle qu'on trouve sur Terre et qui constitue la majorité de la matière visible de l'univers, est formée de seulement quatre fermions élémentaires différents :

- les quarks *up* et *down* permettent de former les nucléons et donc les noyaux des [atomes](#) ;
- l'électron permet, avec les noyaux atomiques, de former les atomes ;
- le [neutrino électronique](#) est créé dans la [radioactivité beta](#) et est en grande quantité dans l'univers.

Quarks		Leptons	
-1/3 d 5 → 15 MeV	+2/3 u 2 → 8 MeV	-1 e ⁻ 0,511 MeV électron	0 ν _e <15 eV neutrino-e
down	up		

Le nombre en haut à gauche est la charge électrique, par définition le [proton](#) a une charge +1. Le nombre du milieu est la masse exprimée en [electron-volt](#), les masses des quarks sont mal connues, la masse du neutrino n'a pas encore pu être mesurée. © DR

L'électron a été découvert en 1897 par J.-J. Thomson. Les quarks ne furent mis en évidence expérimentalement qu'en 1975 après avoir été imaginés par Bjorken et Feynman dans les années 1967-1970 pour expliquer les propriétés des protons, [neutrons](#) et autres particules contenant des quarks.

Bien que la radioactivité ait été découverte en 1898, le neutrino est resté longtemps inconnu, en raison de sa très faible interaction avec la matière qui le rend très difficilement détectable. Néanmoins, il est rapidement apparu (vers 1925) qu'une autre particule que l'électron devait être présente dans la désintégration beta. Ainsi, en 1930, W. Pauli fit l'hypothèse de l'existence du [neutrino](#). Puis, en 1933, E. Fermi baptisa le neutrino (= petit neutre) et élabora une première théorie de l'interaction faible. Finalement, il fallut attendre 1956 pour que F. Reines et C. Cowan observent pour la première fois des neutrinos, en se plaçant à proximité d'une des premières [centrales nucléaires](#), source intense de neutrinos.

Pour chacune de ces particules existe aussi une [antiparticule](#) : anti-quarks, antiélectron, antineutrino.

Les trois familles de fermion

En 1937, une nouvelle particule fut découverte dans les [rayons cosmiques](#) : elle possède les mêmes propriétés que l'électron, sauf sa masse qui est environ 200 fois supérieure. Cette nouvelle particule fut appelée le [muon](#).

À partir de 1947, toujours dans les rayonnements cosmiques, de nombreuses nouvelles particules, des [hadrons](#), furent découvertes, paraissant étranges. C'est pour interpréter ces nouvelles particules, ainsi que les particules déjà connues, que le concept de quarks fut élaboré, avec seulement au début trois quarks : le *up*, le *down* et le quark *s* (pour *strange*), quark contenu dans ces nouvelles particules. Ce quark *s* possède les mêmes propriétés que le [quark d](#), sauf sa masse plus élevée. En 1962, une expérience montra qu'il existe un autre neutrino, le [neutrino muonique](#), compagnon



Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

du muon comme le neutrino électronique est compagnon de l'électron dans la désintégration beta.

Ainsi, il apparut que, en plus de la matière ordinaire (les quarks u et d, l'électron et le neutrino électronique), existaient d'autres particules semblables aux premières mais seulement plus lourdes. Ces nouvelles particules peuvent se ranger dans une deuxième famille, la première famille regroupant la matière ordinaire. Mais, pour compléter la deuxième famille, il manquait un quark, le compagnon du s, et il fut donc introduit dans la théorie par Glashow, Iliopoulos et Maiani en 1970 sous le nom de charme. La découverte de ce quark en 1974 confirma la théorie, et permit de compléter la deuxième famille de leptons.

Famille	Quarks		Leptons	
1	-1/3 d 5 à 15 MeV down	+2/3 u 2 à 8 MeV up	-1 e- 0,511 MeV électron	0 v_e <15 eV neutrino-e
2	-1/3 s 100-300 MeV étrangeté	+2/3 c 1,3 GeV charme	-1 μ^- 106 MeV muon	0 v_μ <0,17 MeV neutrino-mu
3	-1/3 b 4,3 GeV beauté	+2/3 t 182 GeV top	-1 τ^- 1,78 GeV tau	0 v_τ <24 MeV neutrino-tau

Le nombre en haut à gauche est la charge électrique, par définition le proton a une charge +1. Le nombre au milieu est la masse exprimée en electron-volt, les masses des neutrinos n'ont pas encore pu être mesurées. © DR

Peu après la découverte du quark c, un nouveau lepton fut découvert, encore plus massif que le muon mais possédant les mêmes propriétés, il fut appelé le tau. Ce nouveau lepton semblait donc montrer l'existence d'une troisième famille de fermions.

Ainsi, afin de compléter la troisième famille et pour expliquer un phénomène nouveau (la Violation de la symétrie CP), une troisième famille de quarks, les quarks b et t, furent introduits dans la théorie. Le quark b fut ensuite découvert en 1977 et le quark t plus récemment en 1994.

Néanmoins, pour que la troisième famille soit complète, il manque le neutrino tau dont l'existence n'est pas remise en question mais n'a pour l'instant pas été mise en évidence expérimentalement de manière directe. Par contre, le nombre de neutrinos de masse inférieure à 45GeV a été mesuré et il est de trois, ce qui rend l'existence du neutrino tau indispensable.

Il existe ainsi trois familles de fermions élémentaires dont les propriétés sont identiques, la seule différence entre ces familles étant la masse. Cette structure est pour l'instant totalement inexpliquée. La première famille constitue la matière ordinaire, les autres familles ne sont présentes que dans les rayons cosmiques et lors de collisions dans des accélérateurs de particules.

Pour chacune de ces particules existe aussi une antiparticule : antiquark, antiélectron, antimuon, antitau, antineutrino.

Peut-on observer des quarks libres ?

La théorie de l'interaction forte (QCD) montre que les quarks ne peuvent jamais être libres : il n'est donc pas possible d'observer un quark seul. Les quarks sont donc toujours confinés à l'intérieur de particules composites appelées hadrons. Les protons et les neutrons sont des exemples de hadrons.

On distingue deux catégories de hadrons :

- les hadrons formés de trois quarks sont des baryons, comme les protons ou les neutrons ;
- les hadrons formés d'un quark et un anti-quark sont des mésongs.



Quelle est la masse des neutrinos ?

La masse des neutrinos est théoriquement nulle, mais il n'existe aucun argument pour que ces masses soient réellement nulles. Pour l'instant, les masses des neutrinos n'ont pas été mesurées et seulement des limites supérieures sur ces masses existent. Ce qui est sûr, c'est que ces masses sont très faibles par rapport aux leptons associés. Par exemple, le neutrino électronique a une masse au moins trente mille fois plus faible que celle de l'électron.

Le 5 juin 1998, au Japon, l'expérience [Super-Kamiokande](#) a annoncé avoir mis en évidence une masse non nulle pour un neutrino. Cette masse est très faible mais est différente de zéro. Il faudra attendre d'autres résultats pour en savoir plus sur la masse des neutrinos...

L'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et l'interaction faible sont à la base de tous les processus physiques, chimiques ou biologiques connus. Elles sont appelées les quatre forces fondamentales.



L'interaction gravitationnelle (une des forces fondamentales) est responsable du phénomène des marées. © vivejm, Flickr CC by nc-sa 2.0

Quelles sont les interactions fondamentales ?

Tous les processus physiques, chimiques ou biologiques connus peuvent être expliqués à l'aide de quatre interactions fondamentales :

- l'interaction gravitationnelle, responsable de la pesanteur, de la [marée](#) ou encore des phénomènes astronomiques ;
- l'interaction électromagnétique, responsable de l'électricité, du magnétisme, de la [lumière](#) ou encore des réactions chimiques et biologiques ;
- l'interaction forte, responsable de la cohésion des noyaux atomiques ;
- l'interaction faible, responsable de la [radioactivité](#) beta, qui permet au [Soleil](#) de briller.

La théorie qui décrit la [gravitation](#) est la [relativité générale](#), celle qui décrit les trois autres est le [modèle standard](#).

Qu'est-ce que l'interaction gravitationnelle ?

L'interaction gravitationnelle est une force toujours attractive qui agit sur toute forme d'énergie, mais avec une intensité extrêmement faible (c'est l'interaction la plus faible des quatre interactions fondamentales). Ainsi, ses effets ne sont perceptibles que lorsque des objets très massifs (la masse est une forme d'énergie) sont en jeu, c'est le cas pour les objets astronomiques.

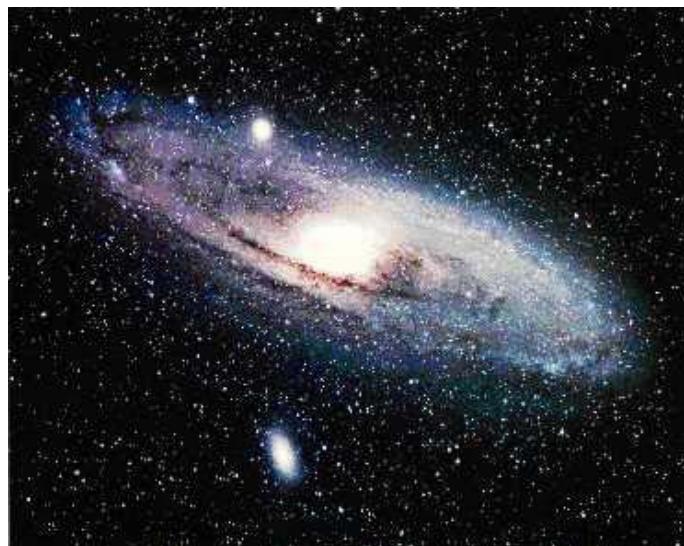
L'énorme masse des [étoiles](#), des planètes ou des [galaxies](#) les rend donc très sensibles à la gravitation et c'est la seule interaction en jeu pour expliquer les [mouvements](#) de ces objets.

De même, l'énorme masse de la Terre (6.10^{24} [kg](#), soit six mille milliards de milliards de tonnes !) la rend très attractive pour des objets moins massifs. Ainsi, la pesanteur et donc le poids des objets sur



Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

Terre sont le résultat de l'attraction gravitationnelle de la Terre sur ces objets. C'est pourquoi, le poids d'un objet est plus faible sur la [Lune](#) que sur Terre, puisque la masse de la Lune est plus faible que celle de la Terre.



Lénorme masse des étoiles, des planètes ou des galaxies les rend très sensibles à la gravitation. © DR

Enfin, c'est l'attraction gravitationnelle de la Lune sur l'eau des océans (dont la masse totale est importante) qui permet d'expliquer le phénomène des marées.

Le premier à avoir compris que la pesanteur terrestre et les mouvements astronomiques étaient le résultat d'une seule et même interaction est [Isaac Newton](#), qui publia en 1687 un livre dans lequel il a établi les lois de la gravitation. Il fallut ensuite attendre 1915 pour qu'[Albert Einstein](#) développe la théorie de la relativité générale, qui permet d'expliquer la gravitation par une théorie géométrique mais non quantique. La gravitation n'est donc pas du tout prise en compte par la physique des particules, mais son intensité est totalement négligeable à l'échelle des particules élémentaires.

Qu'est-ce que l'interaction électromagnétique ?

L'interaction électromagnétique est une force répulsive ou attractive qui agit sur les objets ayant une charge électrique. Deux objets de charges électriques de mêmes signes se repoussent alors que deux objets de charges électriques de signes opposés s'attirent. Comme les [atomes](#) sont électriquement neutres, il y a peu d'effet de cette interaction à grande échelle.



L'interaction électromagnétique peut créer de la lumière ou des [rayons X](#). © DR

L'interaction électromagnétique est bien sûr à l'origine de tous les phénomènes électriques et magnétiques. L'interaction électromagnétique permet aussi la cohésion des atomes en liant les [électrons](#) (charge électrique négative) et le noyau des atomes (charge électrique positive). Cette même liaison permet de combiner les atomes en [molécules](#) et l'interaction électromagnétique est donc responsable des réactions chimiques. Enfin, la chimie de certaines classes de molécules permet d'expliquer la biologie.

Cette interaction peut, dans certaines conditions, créer des ondes électromagnétiques, parmi lesquelles on distingue la lumière, les ondes [radio](#), les ondes radar, les rayons X...

En bref, l'interaction électromagnétique permet d'expliquer presque tous les phénomènes de la vie quotidienne (mise à part la pesanteur)...

La première grande étape dans la compréhension de l'[électromagnétisme](#) vient de l'unification de l'électrodynamique et du magnétisme en une seule et même interaction par J.-C. Maxwell en 1860. Puis,



en 1864, Maxwell comprit que la lumière était une onde électromagnétique. Enfin, en 1887, H. Hertz montre l'existence d'ondes électromagnétiques autres que la lumière.

Quelques années plus tard, la mécanique quantique se développe et la théorie de l'électromagnétisme est quantifiée, la nature quantique de cette interaction (l'existence du photon) ayant déjà été découverte par Einstein en 1905. Finalement, après la résolution de problèmes techniques, la première théorie à la fois quantique et relativiste est achevée dans les années 1948-1949 par Tomonaga, Schwinger et Feynman, c'est l'electrodynamique quantique ou QED. Mais, comment fonctionne QED ?

Qu'est-ce que l'interaction forte ?

L'interaction forte est une force qui agit sur les quarks et par extension sur les hadrons. Les leptons y sont totalement insensibles.

L'interaction forte permet la cohésion des noyaux atomiques en liant les protons et les neutrons entre eux au sein de ce noyau. Si cette interaction n'existe pas, les noyaux ne pourraient pas être stables et seraient dissociés sous l'effet de la répulsion électrostatique des protons entre eux.

L'interaction forte est aussi responsable des réactions nucléaires, source d'énergie des étoiles et donc du Soleil.

L'histoire des interactions fortes commence en 1911 avec la découverte du noyau atomique par Rutherford. En effet, il fallut trouver une nouvelle force pour expliquer que les noyaux atomiques ne se disloquent pas sous l'effet électrique répulsif des protons entre eux. Néanmoins, il fallut attendre 1967-1970 et le développement du modèle des quarks pour que la théorie de l'interaction forte soit élaborée, c'est-à-dire la chromodynamique quantique ou QCD. Mais, comment fonctionne QCD ?

Qu'est-ce que l'interaction faible ?

L'interaction faible est une force qui agit sur toutes les particules. En particulier, c'est la seule force à laquelle sont sensibles les neutrinos.

L'interaction faible est responsable de la radio-activité beta qui permet les réactions nucléaires qui sont la source d'énergie du Soleil. La radioactivité naturelle est probablement aussi une source d'énergie importante pour maintenir le magma en fusion sous la croûte terrestre.

L'histoire de l'interaction faible commence bien sûr en 1896 avec la découverte de la radioactivité par Becquerel. Il faut ensuite attendre 1933 pour que E. Fermi élabore le premier modèle des interactions faibles en incorporant l'existence non encore démontrée du neutrino. Puis, en 1961, S.-L. Glashow tente d'unifier l'interaction faible et l'électromagnétisme en une seule interaction électrofaible. Cette unification prédit l'existence d'une interaction faible par courant neutre qui est découverte en 1973. Elle prédit aussi l'existence de vecteurs de cette interaction, les W^+ , W^- et Z^0 , qui sont à leur tour découverts en 1983. Mais, comment agissent les W et le Z^0 ?

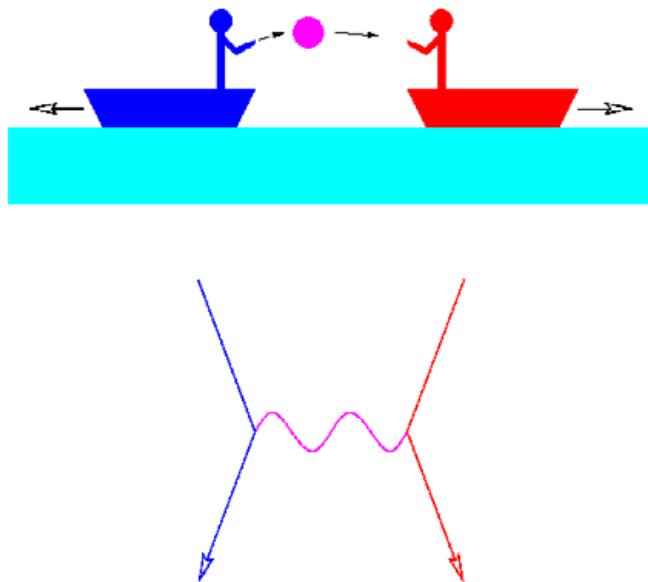
Interactions et échanges de particules

Les interactions sont expliquées en physique des particules comme l'échange entre particules de matière et particules de rayonnement.

Le dessin ci-dessous montre deux bateaux qui s'éloignent l'un de l'autre car leurs occupants échangent un ballon (par le principe d'action-réaction bien connu). Il y a donc interaction à distance entre les deux bateaux par échange d'un objet intermédiaire (le ballon). Cet objet est appelé le vecteur de l'interaction.

Ainsi, en physique des particules, on explique toute interaction entre particules par l'échange entre ces particules de vecteurs (qui sont eux-mêmes des particules).





Exemple d'interaction entre deux particules (bleue et rouge) par l'échange d'une particule (magenta), tout comme les deux bateaux bleu et rouge interagissent en échangeant un ballon (magenta). On peut aussi imaginer que plus le ballon est lourd, plus il sera difficile aux occupants du bateau de le lancer loin. Ainsi, si le ballon est trop lourd, les bateaux ne pourront plus interagir au-delà d'une certaine distance. De même, en physique des particules, plus la particule vecteur d'une interaction sera lourde, plus cette interaction sera de courte portée.

Certains [atomes](#) sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils émettent un rayonnement. En fait, c'est le noyau de ces atomes qui émet ce rayonnement, car ce noyau est instable. Contrairement à ce que beaucoup de gens croient, la [radioactivité](#) est un phénomène tout à fait naturel. On distingue trois types de radioactivité d'origines différentes : les radioactivités alpha, beta et gamma. Parmi les [réactions nucléaires](#) possibles, se trouvent la [fission nucléaire](#) et la [fusion nucléaire](#).

La radioactivité alpha

Un atome radioactif alpha émet une « particule alpha », c'est-à-dire un noyau d'[hélium](#) (en fait deux [protons](#) et deux [neutrons](#)). Ainsi le noyau, en perdant deux protons, change de nature. Par exemple, un atome de polonium 210 (84 protons et 126 neutrons) devient, par [radioactivité](#) alpha, un atome de plomb 206 (82 protons et 124 neutrons). L'origine de la radioactivité alpha est une instabilité globale du noyau de l'atome qui se stabilise en éjectant ces deux protons et deux neutrons.

La radioactivité beta

La radioactivité beta existe sous deux formes : beta+ et beta-. Un atome radioactif beta- émet un [électron](#) et un antineutrino électronique. Un atome radioactif beta+ émet un antiélectron (ou [positron](#)) et un [neutrino électronique](#). En plus de cette [émission](#) de particules, la nature des [nucléons](#) de ce noyau est modifiée. Ainsi, dans le cas d'une désintégration beta-, un neutron se change en proton. Dans le cas d'une désintégration beta+, c'est un proton qui se change en neutron. Le noyau change donc de nature.

Par exemple, un atome de potassium 40 (19 protons et 21 neutrons) devient, par radioactivité beta-, un atome de [calcium](#) 40 (20 protons et 20 neutrons). De même, un atome de [carbone](#) 14 (6 protons et 8 neutrons) se désintègre en un atome d'azote 14 (7 protons et 7 neutrons). L'origine de la radioactivité beta est une désintégration d'un proton ou d'un neutron par interaction faible.

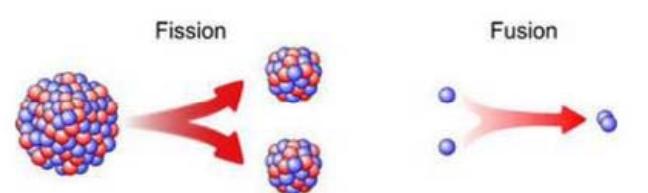
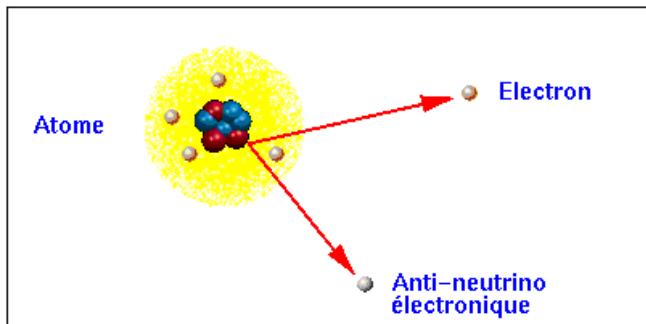
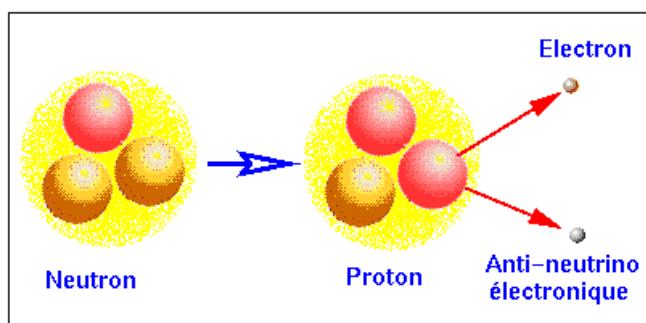


Illustration de la différence entre la fission et la fusion nucléaire. © DR



La radioactivité beta. © Crédits réservés

Plus précisément, c'est un des quarks du nucléon qui se désintègre. Ainsi, dans le cas de la radioactivité beta-, un quark down du neutron se désintègre en un quark *up*, un électron et un antineutrino électronique. Il reste donc dans le nucléon deux quarks *up* et un quark *down*, le neutron devient donc un proton. Dans le cas de la désintégration beta+, un quark *up* du proton se désintègre en un quark *down*, un positron et un neutrino électronique, le proton devient donc un neutron.



Le neutron devient proton. © DR

La radioactivité gamma

Un atome radioactif gamma émet un photon (aussi appelé gamma). L'origine de cette radioactivité est une excitation globale du noyau qui se désexcite en émettant ce photon (donc en perdant de l'énergie). Cette excitation initiale du noyau est souvent due à

une première désintégration par radioactivité alpha ou beta et la radioactivité gamma accompagne donc souvent ces deux premières.

La radioactivité gamma ne change pas la nature de l'atome qui la subit, puisque le nombre de nucléons ne change pas dans le noyau.

Un peu d'histoire

La découverte de la radioactivité est très récente, puisqu'elle remonte à la fin du XIX^e siècle, et a révolutionné la science. En effet, c'est cette découverte qui a permis de commencer à comprendre la structure des atomes.

En 1896, Henri Becquerel découvre la radioactivité de l'uranium, alors qu'il étudie les rayons X découverts par Röntgen un an plus tôt. Quelques mois plus tard, Marie Skłodowska, qui vient d'épouser Pierre Curie, soutient sa thèse et montre que, comme l'uranium, le thorium est aussi radioactif. En 1898, Pierre et Marie Curie发现 un élément beaucoup plus radioactif, qu'ils appellent le polonium. Puis, ils发现 un autre élément très radioactif, le radium, ce qui leur vaut le prix Nobel de physique en 1903. De plus, Marie Curie reçoit le prix Nobel de chimie en 1911 pour sa mise au point d'un procédé permettant d'isoler le radium.

Enfin, en 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie (Irène est la fille de Pierre et Marie Curie)发现 la radioactivité artificielle. Ils sont récompensés l'année suivante par le prix Nobel de chimie.

Qu'est-ce que la période d'un élément radioactif ?

Un élément radioactif alpha ou beta change de nature à mesure que ses atomes se désintègrent. Ainsi, si on a une quantité d'un élément radioactif, après un certain temps une partie de cet élément aura été transformée en un autre élément, la quantité d'élément de départ aura diminué. Au bout d'un

moment, il ne restera plus que la moitié de l'élément de départ, ce temps est la période de cet élément.

Par exemple, si on a 10 grammes de polonium 210 au départ, il faudra attendre environ 138 jours pour n'en avoir plus que 5 grammes, on aura alors aussi environ 5 grammes de plomb 206. La période du polonium 210 est donc de 138 jours. Autre exemple, si on a 10 grammes de potassium 40 au départ, il faudra attendre 1,3 milliards d'années pour n'en avoir plus que 5 grammes ! Enfin, la période du carbone 14 est de 5.600 ans. On peut donc voir que les périodes peuvent être très différentes pour différents éléments.

La radioactivité naturelle

La radioactivité naturelle est très importante mais assez mal connue. C'est probablement une source d'énergie importante qui contribue à maintenir le magma en fusion sous la croûte terrestre (que l'on aperçoit parfois en surface sous la forme de lave).

Un corps humain contient environ 20 milligrammes de potassium 40, un élément radioactif beta naturel.

Ainsi, un corps humain produit environ 340 millions de désintégrations beta par jour, naturellement !

La connaissance des proportions naturelles des éléments radioactifs et de leurs périodes permet de calculer l'âge d'objets qui les contiennent. Cette méthode est largement utilisée pour dater des objets par les archéologues, par exemple en utilisant le carbone 14.

La radioactivité artificielle

Certains éléments radioactifs sont naturellement présents dans la nature : par exemple le carbone 14 ou le potassium 40. Cependant, il est aussi possible de créer artificiellement des éléments radioactifs qui ne se trouvent pas dans la nature, c'est la radioactivité artificielle. Pour cela, il faut bombarder des

atomes « naturels » avec des protons ou des neutrons (ou des noyaux d'hélium, les particules alpha). De cette manière, les noyaux des atomes de départ sont modifiés, c'est donc une réaction nucléaire.

Qu'est-ce que la fission nucléaire ?

La fission d'un atome correspond à la séparation en deux morceaux du noyau de cet atome, avec en plus quelques neutrons. Les deux atomes restant sont en général radioactifs.

Un atome peut fissioneer soit de manière spontanée si son noyau est trop lourd, soit parce qu'il a été heurté par un neutron. Ainsi, les neutrons émis lors de la fission vont engendrer d'autres fissions, ce qui se traduit par une réaction en chaîne. C'est ce processus qui est utilisé dans les réacteurs nucléaires et les bombes A, car la fission s'accompagne de libération d'énergie.

Qu'est-ce que la fusion nucléaire ?

La fusion de deux atomes apparaît lorsque les noyaux de ces deux atomes sont suffisamment proches l'un de l'autre pour fusionner, c'est-à-dire pour former un unique noyau.

Comme les noyaux ont une charge électrique positive, ils se repoussent mutuellement, ce qui les empêche de fusionner. Si ces atomes sont dans un milieu très chaud, ils auront des vitesses suffisamment élevées pour pouvoir fusionner avant d'être séparés par la répulsion électromagnétique. C'est pourquoi on parle souvent de fusion thermonucléaire. Au cœur du Soleil, la température est suffisamment élevée pour que des réactions de fusion nucléaire aient lieu : c'est ce qui fait briller le Soleil, car ces réactions s'accompagnent de libération d'énergie.

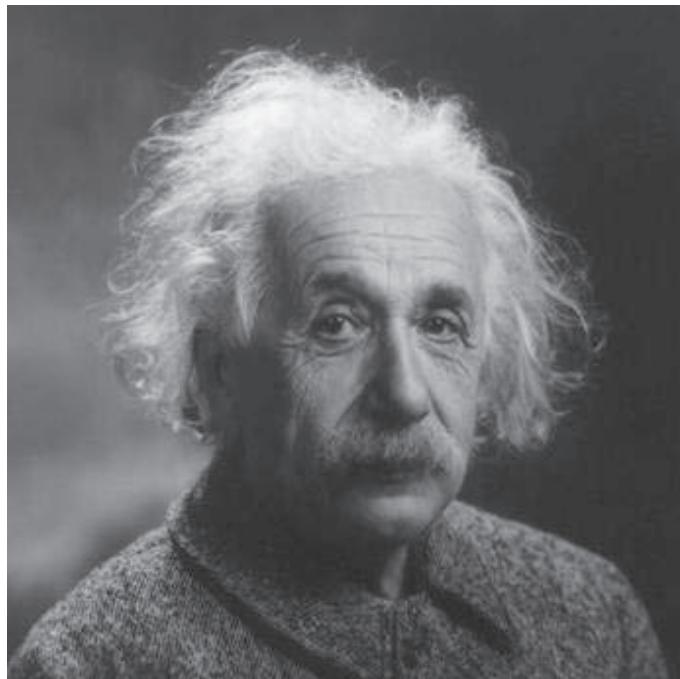
La fusion nucléaire n'est pas encore utilisée pour produire de l'énergie car il est très difficile de faire un réacteur fonctionnant à la température nécess-



Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

saire de plusieurs millions de degrés ! Par contre, elle est malheureusement utilisée dans les bombes H.

Le modèle standard de la physique des particules (en abrégé « modèle standard ») est la théorie actuelle qui permet d'expliquer tous les phénomènes observables à l'échelle des particules. Le modèle standard englobe donc toutes les particules connues ainsi que les trois interactions ayant un effet à l'échelle des particules : l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et l'interaction faible. Le modèle standard permet donc d'expliquer tous les phénomènes naturels sauf la gravitation qui, pour l'instant, résiste aux théoriciens pour une théorie quantique...



Le modèle standard repose sur la mécanique quantique et la théorie de la relativité d'Einstein. © Thomas Thomas, Flickr CC by nc 2.0

Qu'est-ce que le modèle standard ?

Le modèle standard est une théorie de champs quantique, c'est donc une théorie à la fois quantique et relativiste.

Le modèle standard contient deux interactions distinctes : l'interaction forte expliquée par QCD et

l'interaction électrofaible qui est une unification de l'interaction faible et de l'électromagnétisme, dont la théorie (QED) est inclue dans cette interaction. Ces interactions sont expliquées par l'échange de bosons de jauge (les vecteurs de cette interaction) entre fermions élémentaires.

Le modèle standard prédit aussi l'existence du boson de Higgs, particule qui permet de donner une masse aux autres particules de la théorie. Cette particule n'a pas encore été découverte.

Quelles sont les particules élémentaires ?

Les particules élémentaires du modèle standard sont au nombre de 24 :

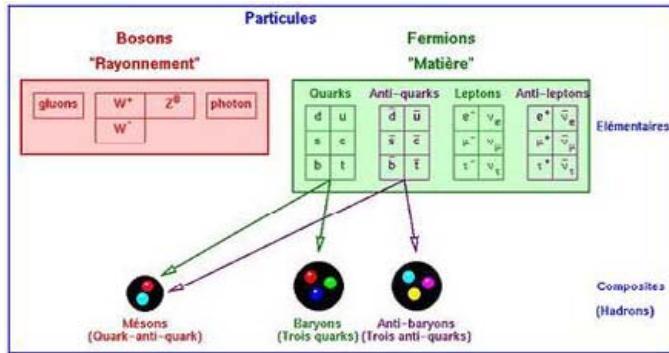
12 bosons de spin 1 qui sont les particules de « rayonnement » et qui sont les vecteurs des différentes interactions :

- 8 gluons qui transmettent l'interaction forte ;
- les W^+ et W^- qui transmettent l'interaction faible ;
- le Z^0 qui transmet une forme de l'interaction faible provenant de l'interaction électrofaible ;
- le photon qui transmet l'interaction électromagnétique.

12 fermions de spin $\frac{1}{2}$ qui sont les particules de « matière », séparées en deux catégories :

- 6 quarks et leurs antiquarks, qui forment des particules composites : les hadrons ;
- 6 leptons et leurs antileptons.





Les particules élémentaires du modèle standard. © Crédits réservés

Un peu d'histoire...

Le modèle standard est le fruit de plus de quarante années de recherche théorique et expérimentale. Le point de départ est QED, achevée entre 1948 et 1949, qui est la théorie quantique et relativiste de l'interaction électromagnétique. En 1954, C.-N. Yang et R. Mills généralisent QED en développant les théories de champs de jauge, outil indispensable pour l'élaboration du modèle standard et, en particulier, la première tentative d'unification des interactions faible et électromagnétique en une théorie électrofaible par S.-L. Glashow en 1961.

Le problème principal de la théorie électrofaible de Glashow est que les particules qu'elle décrit sont sans masse, ce qui est en désaccord avec la réalité. En 1967, S. Weinberg et A. Salam modifient ce modèle en y incorporant le boson de Higgs qui permet de donner une masse aux particules de la théorie.

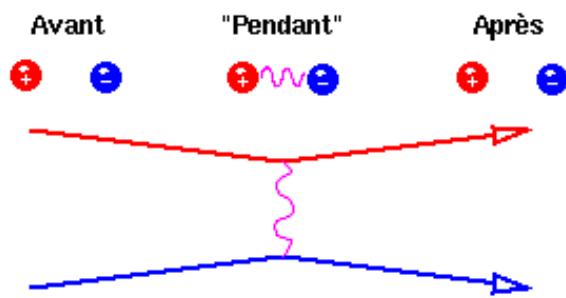
Finalement, en 1970, S.-L. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani intègrent les quarks à la théorie électrofaible en prédisant l'existence du quatrième quark, le charme. Quelques années plus tard, QCD est ajoutée à la théorie électrofaible pour expliquer l'interaction forte : le modèle standard est achevé.

Une des principales prédictions de la théorie électrofaible est l'existence de l'interaction faible par courant neutre, découverte quelques années plus tard, en 1973, ce qui confirme de manière éclatante

ce modèle. L'autre prédition très importante est l'existence des bosons de jauge W et Z_0 responsables des interactions faibles. Leur découverte en 1983 couronne le succès du modèle standard qui reste pour le moment la seule théorie valable.

QED ou comment agissent les photons

Dans l'électrodynamique quantique (QED), l'interaction électromagnétique est expliquée comme l'échange de photons entre fermions élémentaires possédant une charge électrique. Le photon est donc le vecteur de l'interaction électromagnétique. Le photon n'ayant pas lui-même de charge électrique (il est neutre), les particules qui échangent des photons conservent leur charge électrique inchangée après l'échange. La masse du photon étant nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie.



Exemple d'échange d'un photon (en magenta) entre deux fermions de charges électriques opposées (en rouge et bleu). Le temps va de la gauche vers la droite. © DR

Le neutrino n'ayant pas de charge électrique, c'est le seul fermion élémentaire qui n'est pas sensible à l'interaction électromagnétique.

QCD ou comment agissent les gluons ?

Dans la chromodynamique quantique (QCD), l'interaction forte est expliquée comme l'échange de gluons entre fermions élémentaires possédant une charge de couleur. Les gluons sont donc les vecteurs de l'interaction forte. Il existe 8 gluons de charges de

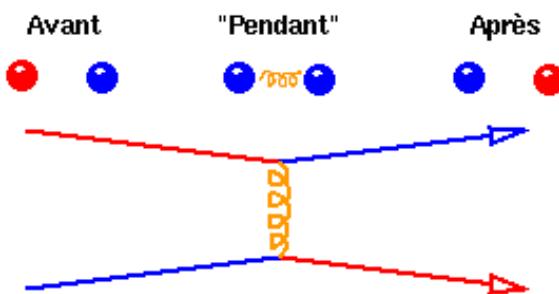


Voyage au cœur de la matière - 13/02/2003

couleur différentes (des combinaisons d'une couleur et d'une anticolore).

Seuls les quarks possèdent une charge de couleur, les leptons sont donc neutres vis à vis de l'interaction forte, ils n'y sont donc pas sensibles. La charge de couleur peut prendre trois « valeurs » : elle peut être rouge, verte ou bleue (ces couleurs n'ont rien à voir avec les couleurs visibles, c'est simplement une façon poétique de nommer une notion n'ayant pas d'équivalent à notre échelle).

Les gluons possèdent eux-mêmes une charge couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, les quarks échangent leurs couleurs respectives.



Exemple d'échange d'un gluon (en orange) entre deux quarks de charges de couleur différentes. L'échange du gluon permet aux deux quarks d'échanger leurs couleurs. Le temps va de la gauche vers la droite. © DR

La masse des gluons est nulle, mais comme ils portent une charge de couleur et donc peuvent interagir entre eux, la portée de l'interaction forte n'est pas infinie, elle est de l'ordre de 10^{-15} m, elle est donc très courte ! Le comportement de l'interaction forte est ainsi assez étrange : plus les quarks sont éloignés, plus leur interaction est forte... À la limite où ils sont infiniment proches, ils n'interagissent plus du tout, c'est ce qu'on appelle la liberté asymptotique. Cette caractéristique est à l'origine du confinement des quarks à l'intérieur des hadrons : les quarks ne peuvent pas être libres.

Les particules directement observables sont donc les hadrons, c'est-à-dire des états liés de plusieurs quarks. Ces hadrons doivent être « blancs », c'est-à-dire avoir une charge de couleur nulle. Ainsi, on peut avoir :

- des baryons, qui contiennent trois quarks. Un rouge, un vert et un bleu, le total est donc le blanc (et aussi les antibaryons) ;



- des mésions qui contiennent un quark d'une couleur (rouge, vert ou bleu) et un antiquark de l'anticouleur correspondante, le total étant aussi l'absence de couleur.



Comment agissent les W^+ , W^- et Z^0 ?

Dans la théorie électrofaible, l'interaction faible présente deux aspects :

- l'interaction faible par courants chargés où les vecteurs de l'interaction sont les W^+ et W^- ,
- l'interaction faible par courant neutre où le vecteur de l'interaction est le Z^0 .

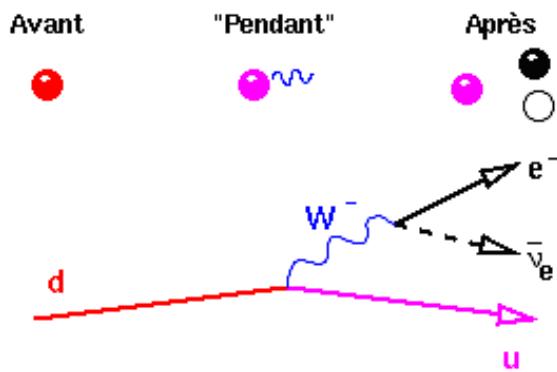
Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires, en particulier c'est la seule interaction à laquelle est sensible le neutrino.

La masse des W et du Z^0 est très élevée (80 GeV pour les W et 91 GeV pour le Z^0 , soit presque cent fois plus qu'un proton), la portée de l'interaction faible est donc très courte, de l'ordre de 10^{-18} m !

Les W ont une charge électrique non nulle, ce qui signifie que lors de l'échange d'un W , les fermions changent de charge électrique, ils changent donc aussi de saveur (on appelle la « saveur » d'un fermion sa nature : électron, neutrino, quark u, quark



d, etc...). Ainsi, la radioactivité beta d'un neutron est expliquée par l'émission d'un W par un quark d du neutron, qui change donc alors de saveur et devient un quark u, puis le W se matérialise en un électron et un antineutrino électronique.



Exemple de désintégration d'un quark d (en rouge) en un quark u (en magenta) avec émission d'un W- (en bleu) qui se matérialise en un électron (en noir) et un antineutrino électronique (en blanc). Le temps va de la gauche vers la droite. © DR

Le Z^0 n'a pas de charge électrique, il n'y a donc pas de changement de saveur lors d'une interaction faible par courant neutre. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils peuvent aussi échanger un Z^0 . Par contre, un neutrino peut échanger un Z^0 avec une autre particule mais pas un photon.

Qu'y a-t-il au-delà du modèle standard ?

Malgré les grands succès du modèle standard et bien qu'il n'ait jusqu'à présent jamais été mis en échec, le modèle standard n'est pas la théorie ultime de la physique. La raison principale est l'absence de la gravitation dans la théorie. Ensuite, le modèle standard est incapable d'expliquer l'existence des trois familles de fermions, ni de prédire leurs masses. Enfin, il semble naturel de tenter d'unifier toutes les interactions, ce qui a partiellement été fait avec la théorie électrofaible, en une seule interaction

universelle (c'est ce qu'on appelle les théories de grande unification).

Ainsi, la recherche continue pour tenter de percer les mystères de la matière, sur le plan expérimental comme sur le plan théorique...

Voici, rassemblées sur une même page, les définitions simples pour bien comprendre la matière.

- **Antiparticule** : une antiparticule possède la même masse que la particule correspondante, mais ses nombres quantiques sont opposés, en particulier la charge électrique.
- **Atome** : Un atome est la plus petite partie d'un corps pur. Il est formé d'électrons et de nucléons. Le nom atome vient du grec et signifie «insécable». Maintenant, on sait que les atomes sont divisibles mais le nom est resté.
- **Baryon** : Un baryon est un hadron composé de trois quarks, comme les nucléons. Le nom baryon vient du grec et signifie « lourd ». En effet, dans les années 1950, les trois catégories de particules connues étaient les leptons, les mésons et les baryons, correspondant aux mots grecs « léger », « moyen » et « lourd ». Maintenant, on connaît un lepton plus lourd que certains baryons mais le nom est resté.
- **Boson** : Un boson est une particule de spin entier, il obéit à la statistique de Bose-Einstein. Les photons, les gluons, les W, le Z⁰ et le Higgs sont des bosons.
- **Électrofaible** : La théorie électrofaible est une unification de QED et des interactions faibles à la base du modèle standard. La théorie électrofaible explique l'interaction faible comme une interaction entre fermions et W et prédit l'existence d'une interaction faible par courant neutre avec une interaction entre fermions et Z^0 .
- **Électron** : Un électron est un lepton. C'est un des constituants de l'atome, avec les nu-



cléons. Il a une charge électrique négative de $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C, qui est la charge électrique élémentaire (on dit donc que sa charge est -1). Sa masse est de $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, soit 0,511 MeV.

- **Électron-volt** : L'[électron-volt](#) (eV) est l'unité d'énergie utilisée en physique des particules : c'est l'énergie acquise par un électron soumis à un potentiel électrique de 1 V. Ainsi, on a $1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19}$ J, c'est donc une unité très faible. Les multiples sont le keV= 10^3 eV, le MeV= 10^6 eV, le [GeV](#)= 10^9 eV... Par la relation de la [relativité restreinte](#) $E=mc^2$ ($c=299\,792,458$ km/s est la vitesse de la [lumière](#) dans le vide), on peut donc exprimer la masse en unités d'énergie. Ainsi, la masse de l'électron de $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg correspond à une énergie de 0,511 MeV.
- **Fermion** : Un fermion est une particule de spin demi-entier, il obéit à la statistique de Fermi-Dirac. Les leptons et les quarks sont des fermions.
- **Gluon** : Un gluon est un boson, c'est la particule qui transmet l'interaction forte. Le nom gluon vient de « glue », car il permet de « coller » les quarks entre eux par l'interaction forte qui, comme son nom l'indique, est beaucoup plus forte que les autres interactions.
- **Hadron** : Un hadron est une particule composite formée de quarks. Il y a deux sortes de hadrons : les baryons et les mésons.
- Le nom hadron vient du grec et signifie « fort ». En effet, les hadrons sont les particules qui sont sensibles à l'interaction forte, contrairement aux leptons.
- **Higgs** : Le [boson de Higgs](#) est la particule du modèle standard qui permet de donner une masse à toutes les autres particules. Il n'a pour l'instant pas été découvert.
- **Lepton** : Un lepton est un fermion élémentaire insensible à l'interaction forte. Il existe six sortes de leptons : l'électron, le [muon](#), le tau et les [neutrinos électronique](#), muonique et tau. Le nom lepton vient du grec et signifi-

fie « léger ». En effet, dans les années 1950, les trois catégories de particules connues étaient les leptons, les mésons et les baryons, correspondant aux mots grecs « léger », « moyen » et « lourd ». Maintenant, on connaît un lepton plus lourd que certains baryons mais le nom est resté.

- **Méson** : Un méson est un hadron composé d'un quark et d'un antiquark. Le nom méson vient du grec et signifie « moyen ». En effet, dans les années 1950, les trois catégories de particules connues étaient les leptons, les mésons et les baryons, correspondant aux mots grecs « léger », « moyen » et « lourd ». Maintenant, on connaît un lepton plus lourd que certains baryons mais le nom est resté.
- **Muon** : Un muon est un lepton. C'est la réplique de l'électron de la deuxième famille.
- **Neutrino** : Un neutrino est un lepton. Il existe trois sortes de neutrinos : le neutrino électronique, le [neutrino muonique](#) et le neutrino tau. Le nom neutrino signifie « petit neutre » par opposition au [neutron](#) dont la masse est élevée alors que le neutrino semble ne pas avoir de masse.
- **Neutron** : Un neutron est un nucléon, il forme le noyau de l'atome avec les [protons](#). Sa charge électrique est nulle.
- **Nucléon** : Un nucléon est un baryon. C'est un des composants de l'atome avec les électrons (il forme le noyau atomique). Il y a deux sortes de nucléons : les protons et les neutrons.
- **Photon** : Un photon est un boson, c'est la particule qui transmet l'interaction électromagnétique. Il est souvent noté gamma. Le nom photon vient du grec et signifie « lumière ». En effet, le photon transmet l'interaction électromagnétique, la lumière étant un exemple d'onde électromagnétique.
- **Proton** : Un proton est un nucléon, il forme le noyau de l'atome avec les neutrons. Sa charge électrique est +1, l'inverse de celle de l'électron. Le nom proton vient du grec et



signifie « le premier », c'est en effet une des premières particules à avoir été identifiée.

- **QCD** : La QCD (*Quantum ChromoDynamics* ou chromodynamique quantique) est la théorie des interactions fortes dans le modèle standard. La QCD explique l'interaction forte comme une interaction entre quarks et gluons.
- **QED** : La QED (*Quantum ElectroDynamics* ou électrodynamique quantique) est la théorie des interactions électromagnétiques, elle est inclue dans le modèle standard. La QED explique l'interaction électromagnétique comme une interaction entre particules électriquement chargées et photons.
- **Quark** : Un quark est un fermion élémentaire sensible à l'interaction forte. Il forme les hadrons. Il existe six sortes de quarks : le quark *up* (u), le quark *down* (d), le quark étrange (s), le quark charmé (c), le quark beau (b) et le quark *top* (t). Le nom quark a été donné à ces particules par Gell-Mann et vient d'un poème de James Joyce (*Finnegans Wake*).
- **Spin** : Le spin d'une particule est son moment angulaire intrinsèque. Le spin est une propriété quantique, il ne peut prendre que des valeurs entières ou demi-entières. Une particule de spin demi-entier est un fermion, une particule de spin entier est un boson.
- **Tau** : Un tau est un lepton. C'est la réplique de l'électron de la troisième famille.
- **W** : Un W est un boson, c'est la particule qui transmet l'interaction faible. Le nom W vient de l'anglais et signifie « faible » (*weak*), car il transmet l'interaction faible qui, comme son nom l'indique, est beaucoup plus faible que les autres interactions.
- **Z⁰** : Un Z⁰ est un boson, c'est la particule qui transmet l'interaction faible par courant neutre. Le nom Z vient de « zéro » car sa charge électrique est nulle.

