

# LA MATIÈRE

## STRUCTURE DE LA MATIÈRE

**O**BSERVÉE à notre échelle, la matière présente une infinie diversité et une impressionnante complexité d'organisation. L'idée qu'une structure plus simple se cache derrière le voile des apparences, que la nature procède d'un petit nombre de lois et de constituants fondamentaux avait conduit les Grecs à postuler l'existence d'*éléments* comme l'air, l'eau ou le feu, puis celle des *atomes*. Après maintes controverses au cours du XIX<sup>e</sup> s., l'atome est devenu une réalité expérimentale ; mais, loin d'être insécable (en grec : *atomos*), il s'est révélé constitué d'*électrons* tournant autour d'un noyau massif, lui-même composé de *neutrons* et de *protons*.

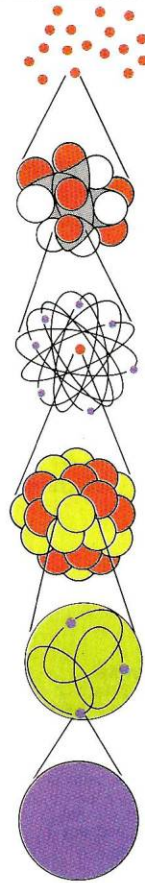
Il y a seulement une trentaine d'années, ces trois briques élémentaires semblaient suffisantes pour reconstituer la matière sous toutes ses formes. Aujourd'hui, si l'électron est toujours considéré comme une particule élémentaire, il est apparu que neutrons et protons sont des assemblages d'objets plus élémentaires encore, les *quarks*. À l'échelle du milliardième de milliardième de mètre, nul ne peut affirmer que le quark n'est pas une particule composite. Les physiciens seraient d'ailleurs enchantés de trouver un autre niveau d'élémentarité. La liste des particules connues est si longue et si difficile à interpréter (un fragment en est reproduit à droite) que toute nouvelle découverte capable de la simplifier serait accueillie à bras ouverts.

La complexité de la matière se retrouve-t-elle à toutes les échelles ? La notion même de constituant élémentaire a-t-elle un sens ?

Ces questions essentielles sont à la base de la physique des particules. Pourtant, si l'imagination des théoriciens ne connaît pas de bornes, le gigantisme des machines nécessaires pour éprouver les théories semble atteindre ses limites.

### Principales particules élémentaires.

particule	symbole	masse (en MeV)	charge électrique
photon	$\gamma$	0	0
neutrino	$\nu$	0 ?	0
antineutrino	$\bar{\nu}$	0 ?	0
électron	$e^-$	0,5	-1
positron	$e^+$	0,5	+1
muon	$\mu$	105	-1
antimuon	$\mu^+$	105	+1
mésons pi	$\pi^-$	140	+1
	$\pi^0$	135	0
	$\pi^+$	140	-1
mésons K	$k^+$	494	+1
	$k^0$	498	0
	$k^-$	494	-1
proton	p	938	+1
antiproton	$\bar{p}$	938	-1
neutron	n	940	0
antineutron	$\bar{n}$	940	0
phi	$\Phi$	1020	0
lambda	$\Lambda$	1116	0
mésons charmés	$D^0$	1863	0
	$D^+$	1868	+1
lambda charmé	$\Lambda_c$	2260	0
famille J ou psi	$J/\psi$	3098	0
	$\psi'$	3684	0
famille upsilon	$Y$	9400	0
	$Y'$	10000	0
	$Y''$	10400	0



### Matière.

Vue au microscope, la matière, liquide, solide ou gazeuse, apparaît constituée de *molécules*.

### Molécules.

Avec une dimension moyenne d'un milliardième de mètre ( $10^{-9}$  m), les molécules sont des assemblages d'*atomes*.

### Atomes.

$10^{-10}$  m : l'atome est lui-même constitué d'*électrons* tournant à grande vitesse autour d'un noyau.

### Noyau.

$10^{-14}$  m : protons et neutrons, des particules beaucoup plus lourdes que l'électron, composent le *noyau* atomique.

### Quarks.

$10^{-15}$  m : les protons et les neutrons, ainsi que d'autres particules lourdes, sont composés de *quarks*.

### Structure des quarks ?

$10^{-18}$  m : le quark possède-t-il à son tour une structure ? La question est pour l'instant sans réponse.

## CONSTITUANTS FONDAMENTAUX

**D**EUX QUARKS et deux *leptons*... Tels sont les ingrédients nécessaires pour fabriquer l'univers, ses galaxies, ses planètes et ses êtres vivants. Les leptons sont l'électron et le *neutrino d'électron*, qu'il est très difficile de détecter : les neutrinos d'électron qui sont émis en permanence par le Soleil traversent notre planète de part en part sans être arrêtés. Les deux quarks, *up* et *down* (haut et bas), s'associent trois par trois pour constituer les protons et les neutrons. Ces particules sont mystérieuses à au moins deux titres. D'abord, elles possèdent des charges électriques fractionnaires :  $+2/3$  et  $-1/3$  de la charge de l'électron. Ensuite, personne n'a en-

core pu observer de quark isolé. Seuls existent des groupes de deux ou trois individus. Mais la nature a répété à au moins trois reprises la structure en quarks et leptons. Une deuxième famille est constituée de deux autres quarks, nommés *charmé* et *étrangé*, et de deux autres leptons, le *muon* et le *neutrino de muon*. La troisième famille comprend le quark *beauté*, le quark *vérité*, le lepton *tau* et le *neutrino de tau*.

Douze particules élémentaires ? Pas tout à fait. Car le quark présente trois variétés, des *couleurs*, ce qui porte le total à 24... Sans compter que viennent s'ajouter les *photons*, *bosons* et *gluons*, qui transmettent les forces entre ces particules élémentaires.

les constituants fondamentaux de la matière			les vecteurs des forces	
dans la matière existant aux énergies supérieures	quarks	leptons	force électro-faible	photons
	up down	électron neutrino d'électron		bosons W
	étrangé charmé	muon neutrino de muon		boson Z
dans la matière existant aux énergies supérieures	beauté vérité (ou 'top)	tau neutrino de tau	force forte	gluons

## MATIÈRE ET ANTIMATIÈRE

**A**ppiquées aux particules élémentaires, les équations de la physique ont la particularité de donner toujours deux solutions de signes opposés. À l'électron, par exemple, elles associent un « anti-électron » (baptisé *positron*), tout aussi « matériel » que l'électron mais de charge positive. Aux neutrinos correspondent des *antineutrinos* et à chaque type de quark, un *antiquark*.

L'antimatière, composée d'antiparticules, est couramment fabriquée à partir de matière dans les accélérateurs. La difficulté consiste à la conserver car, dès qu'elle rencontre de la matière, elle s'annihile. Il reste de l'énergie, qui, à son tour, se transforme en d'autres particules ! Il faut donc réaliser des dispositifs où règne un vide extrêmement poussé.

L'absence d'antimatière dans l'univers observable est une des grandes énigmes de la cosmologie. De nombreux indices laissent penser que, à l'origine, il s'est créé autant de matière que d'antimatière. Comment se fait-il qu'il soit resté un peu de matière - notre Univers - après l'annihilation initiale ? La symétrie entre les deux types de matière suggérée par les équations mathématiques est peut-être moins parfaite qu'il n'y paraît...

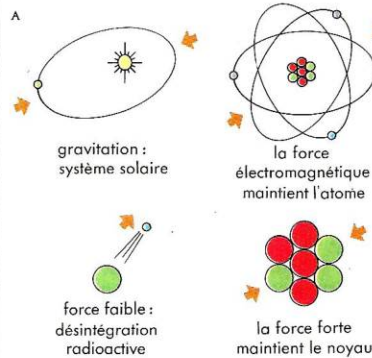


## FORCES, INTERACTIONS

**D**E MÊME QUE LA MATIÈRE stable se construit à partir de quatre particules, il suffit de quatre forces pour décrire tous les phénomènes physiques. La première et la plus anciennement connue, la **gravitation**, rend compte de l'attraction des corps célestes et de la chute des corps. La deuxième, l'**électromagnétisme**, est à la base non seulement du fonctionnement des appareils électriques et électroniques mais aussi des phénomènes optiques et chimiques. C'est elle, dans les atomes, qui maintient les électrons au voisinage du noyau. Les deux autres forces, ou **interactions**, ne se manifestent qu'à très courte distance au sein des noyaux. L'**interaction faible**, ainsi nommée parce qu'elle implique certains processus d'une grande lenteur comme la désintégration radioactive de l'uranium, est à l'œuvre dans toutes les étoiles. Quant à l'**interaction forte**, elle lie entre eux les quarks à l'intérieur du noyau.

Toutes ces forces peuvent être interprétées comme le résultat de l'échange de certaines particules. Les *gravitons*, qui n'ont pas encore été détectés, seraient les messagers de la gravitation ; l'action à distance qu'exerce un aimant résulte de l'échange de *photons* ; les trois *bosons intermédiaires*, baptisés  $Z^0$ ,  $W^+$  et  $W^-$ , sont les médiateurs de l'interaction faible, les *gluons* étant ceux de l'interaction forte. Un électron reste ainsi au voisinage d'un noyau car il absorbe sans cesse (ou émet) les photons émis (ou absorbés) par le noyau. Les bosons intermédiaires se couplent quant à eux aux quarks en changeant les quarks *d* en quarks *u*, c'est-à-dire les neutrons (*udd*) en protons (*uud*).

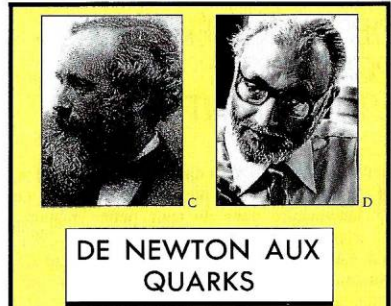
L'échange de gluons entre les quarks, enfin, fait intervenir un autre type de charge, nommé *couleur*, qui a la propriété d'être violemment repoussée par le vide. Voilà pourquoi les quarks et les gluons, individuellement porteurs de couleur (rouge, jaune ou bleu, selon la théorie de la « chromodynamique quantique »), ne peuvent être isolés et pourquoi ils s'associent toujours par groupes de deux ou trois de façon à « mélanger » leurs couleurs pour produire du blanc... Pour eux, c'est la seule manière d'échapper à la réaction du vide et de former des particules stables.



A - Les quatre forces fondamentales.

Quatre forces fondamentales suffisent à expliquer tous les phénomènes naturels. L'interaction forte rend compte de la cohésion du noyau des atomes et l'interaction faible, de sa désintégration radioactive. Alors

que ces forces n'ont qu'une très courte portée, l'électromagnétisme, qui maintient les électrons autour des noyaux, et la gravitation, qui maintient les planètes en orbite autour des étoiles, ont une portée infinie.



### DE NEWTON AUX QUARKS

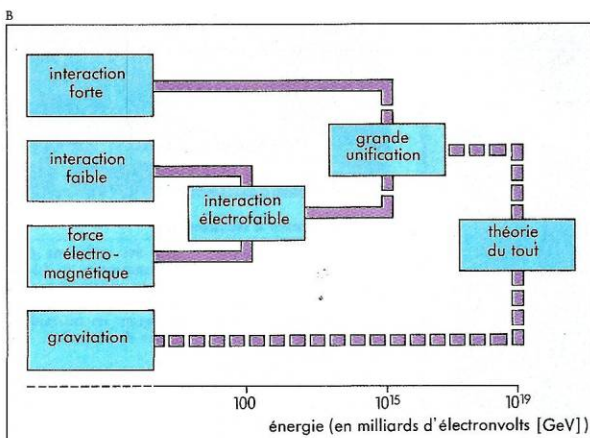
La gravitation, élucidée par Isaac Newton, vient de fêter ses 300 ans d'existence. L'électromagnétisme est l'œuvre du physicien écossais James C. Maxwell (ci-dessus, à gauche) en 1864. La théorie des interactions faibles est apparue dans les années 60 à la suite des travaux des Américains S. Glashow et S. Weinberg ainsi que du Pakistanais Abdus Salam (ci-dessus, à droite). M. Gell-Mann enfin, a fait en 1963 l'hypothèse du quark, particule qui a été mise en évidence sous la forme de petits grains très durs présents à l'intérieur des protons.

## VERS UNE THÉORIE UNIFIÉE

**T**OUJOURS PLUS de simplicité ! Telle pourrait être la devise de la physique théorique. Suivant l'exemple donné par Maxwell, qui unifia électricité et magnétisme, les physiciens viennent d'unifier électromagnétisme et interaction faible. Ils pensent pouvoir désormais réunir cette théorie *électrofaible* à celle qui décrit les interactions fortes, la *chromodynamique*. Le problème est qu'une telle unification, si elle existe, ne se manifeste qu'à des énergies extraordinairement élevées, à jamais hors d'atteinte pour les accélérateurs de particules. Heureusement, les lois de la physique quantique autorisent l'accès à de telles énergies sans l'aide d'aucun accéléra-

teur. Si elle était prouvée, la **grande unification** serait aussi une grande simplification puisque quarks et leptons ne seraient que deux aspects d'une même particule plus fondamentale. De là à rêver d'une théorie du tout, qui inclurait aussi la gravitation, il n'y a qu'un pas.

Selon les meilleurs schémas théoriques actuels, les quatre forces fondamentales à l'œuvre aujourd'hui n'en faisaient qu'une lors de la naissance de l'Univers. Ce n'est qu'après le big bang, lorsque l'énergie a peu à peu diminué, que la force et la matière initiales se sont différenciées pour donner à l'Univers sa diversité... et sa complexité.



B - Les forces fondamentales.

De nature et d'intensité très différentes à basse énergie, les forces fondamentales deviennent comparables à haute énergie. La grande unification est pour l'instant inaccessible.

E - Sous une montagne.

Le détecteur de Kamioka installé à 1 000 m sous l'Ikenoyama, au Japon, pourrait observer la désintégration spontanée d'un des protons de l'eau (la « piscine » en contient 33 000 t) grâce à des photodétecteurs ultrasensibles.

## LE PROTON EST-IL STABLE ?

**L**A GRANDE UNIFICATION prévoit que, à haute énergie, quarks et leptons sont interchangeables. Cela entraîne par exemple que le proton, constitué de quarks, doit pouvoir se volatiliser spontanément lorsqu'un de ses quarks se change en lepton. Cependant, cet événement doit être extrêmement rare, car le calcul de la durée de vie moyenne du proton donne  $10^{31}$  ans, soit beaucoup plus que l'âge de notre Univers (environ  $10^{10}$  ans). Si cette prévision statistique est exacte, on doit pouvoir, en observant  $10^{31}$  protons, assister à quelques désintégrations chaque année. Reste à amasser un grand nombre de protons (souvent de l'eau ou du fer, les matériaux les moins chers) dans une mine ou sous une montagne (pour s'isoler des rayons cosmiques, qui font réagir les détecteurs) et à attendre. Aucun dispositif, pas même cette énorme piscine (ci-dessous) creusée dans une mine au Japon, n'a encore vu de proton se désintégrer...

