La Physique des Particules aussi appelée Physique des Hautes Energies

P.Vilain, G.Wilquet,
Printemps des Sciences ULB 2002

Quels sont les constituants élémentaires de la matière ? Quelles sont les forces qui s'exercent entre ces constituants, leur permettant de d'assembler en structures de plus en plus complexes : noyaux, atomes, molécules … ? Comment les règles du jeu dans le monde de l'infiniment petit nous aident-elles à comprendre l'Univers, ses myriades d'étoiles et de galaxies ?

C'est pour tenter de répondre à ces questions, que les physiciens se sont dotés de gigantesques machines appelées accélérateurs qui permettent de réaliser des collisions à des énergies très élevées et d'étudier, grâce à des détecteurs extrêmement sensibles, les particules issues de ces collisions.

1) Hautes énergies, vraiment ?

Le regard fixé sur les quilles, le lanceur propulse d'un mouvement souple et précis sa boule de bowling de 5 kg. Strike ! A la vitesse de 10 m/s, la boule a percuté les quilles centrales qui, violemment éjectées, ont à leur tour renversé toutes les quilles voisines. L'énergie cinétique de la boule, $E_{cin.} = ½ mv^2$, est 250 Joules.

Changement de décor. Dans un tunnel circulaire de 27 km de long creusé sous la campagne genevoise, des milliers d'aimants entourent un tube d'aluminium d'environ 10 cm de diamètre dans lequel règne un vide poussé. Le champ magnétique de ces aimants a pour effet de maintenir sur une orbite circulaire les électrons qui circulent dans le tube à vide. A chaque tour, ceux-ci traversent plusieurs centaines de cavités accélératrices dans lesquelles leur énergie augmente sous l'effet d'une différence de potentiel de plusieurs millions de volts. A une vitesse proche de celle de la lumière, les électrons effectuent environ 11 000 tours par seconde et leur énergie atteint la

valeur faramineuse de 10^{11} eV ou 100 Gigaélectronvolt*. Leur vitesse est alors 0.9999999999875 fois la vitesse de la lumière dans le vide (soit 300 000 km/s) Impressionnant, non ? Et pourtant, lorsqu'on traduit cette énergie de 100 GeV dans les unités habituelles du cours de physique, on obtient la valeur dérisoire de 1.6 10^{-8} J, soit moins d'un dix milliardième de l'énergie de la boule de bowling ! Mais l'énergie de l'électron, quoique minime, est extraordinairement plus concentrée.

2) Masse et énergie

Pour s'en rendre compte, comparons dans les deux cas, l'énergie cinétique à l'énergie que représente la masse du projectile selon la fameuse relation d'Einstein $E = mc^2$. Pour la boule de bowling, la masse est équivalente à une énergie colossale de 4.5 10^{17} J, très largement supérieure à l'énergie cinétique de 250 J. Fort heureusement pour la survie des joueurs de bowling, cette énergie de masse n'est pas libérée dans le choc avec les quilles et la boule se retrouve intacte pour le lancer suivant ! Par contre, pour un électron de 100 GeV, l'énergie cinétique est 200 000 fois plus grande que l'énergie de masse (m_e = 9 10^{-31} kg ~ 5 10^5 eV/c^2). Lors d'une collision, par exemple avec le noyau d'un atome, une fraction de l'énergie sera convertie en masse par la création de particules nouvelles, la plupart beaucoup plus lourdes que l'électron initial. Jamais, d'une collision d'une boule de bowling, on ne verra ressortir des machines à laver ou des autobus. A l'échelle des particules de grande énergie, c'est un phénomène courant !

La transformation d'énergie en matière est particulièrement efficace lorsque l'accélérateur est utilisé en mode collisionneur : au lieu d'envoyer ces particules accélérées sur une cible fixe, on organise des collisions entre paquets de particules tournant dans des sens opposés. Dans le tunnel de 27 km mentionné ci-dessus, le collisionneur LEP a permis d'étudier des collisions d'électrons de 105 GeV avec des positons* de même énergie. Dans ces chocs frontaux, c'est l'énergie totale,

---

*L'électron-volt est l'unité d'énergie utilisée en Physique des Particules. Un eV est l'énergie acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 Volt.

1 eV ≈ 1.6 10^{-19} J

Les multiples les plus courants : 1 MeV = 10^6 eV (Méga)
1 GeV = 10^9 eV (Giga)
1 TeV = 10^{12} eV (Tera)

* Le positon, noté e^+, est l'antiparticule de l'électron e^-. C'est une des propriétés surprenantes de la physique des Hautes Energies : à toute particule est associée une anti-particule de même masse mais de charge électrique opposée. On est même parvenu au CERN à "fabriquer" quelques anti-atomes d'hydrogène, c'est-à-dire un système formé d'un anti-proton autour duquel orbite un positon e^+.

soit 210 GeV, qui est disponible pour créer de nouvelles particules que les physiciens s'empressent de baptiser, de cataloguer et si possible d'expliquer.

Dans 5 ans environ, ce même tunnel abritera un collisionneur beaucoup plus puissant encore, le LHC (pour **L**arge **H**adron **C**ollider). Cette fois, ce sont des protons qui seront accélérés jusqu'à une énergie de 7000 GeV ou 7 TeV. Les collisions proton-proton à 14 TeV d'énergie totale seront très spectaculaires. Dans chacune d'elles, des centaines de particules seront produites parmi lesquelles, on l'espère fortement, des particules encore inconnues, mais dont les théories les plus récentes suggèrent l'existence.

3) Le zoo des particules

Chacun sait aujourd'hui que toute matière est constituée d'atomes. Un atome contient un noyau central dans lequel 99,95% de la masse est concentrée et autour duquel orbitent des électrons. Si l'atome était agrandi à la taille d'un terrain de football, le noyau aurait environ la taille d'une bille. On utilise parfois la comparaison avec le système solaire mais ne poussons pas l'analogie trop loin : le comportement des électrons atomiques est régi par la mécanique quantique, très différente de la mécanique classique qui fixe les orbites des planètes autour du soleil.

Le noyau est formé de protons (de charge électrique positive) et de neutrons (neutres électriquement, comme le nom l'indique). La stabilité d'un atome peut être comprise assez facilement (même si on ignore la mécanique quantique) : elle est due aux forces d'attraction entre les charges négatives des électrons et les charges positives des protons. Par contre, ce n'est que récemment que l'on a élucidé les mystères de la force nucléaire qui maintient soudés les protons et les neutrons. Nous y reviendrons.

Vers 1930, la liste des particules "élémentaires" est donc très courte : électron (e^-), proton (p) et neutron (n). Les physiciens de l'époque, pour rendre compte des propriétés de certaines désintégrations d'éléments radioactifs y ajoutent le neutrino (ν) bien qu'aucune expérience n'aie pu mettre en évidence cette particule hypothétique. Dans une catégorie à part figure le photon (γ), le "grain" (ou le quantum, pour les spécialistes) de lumière auquel la mécanique quantique attribue le rôle de messager des forces électriques et magnétiques.

La situation va peu à peu se compliquer. Plusieurs types de détecteurs sont mis au point pour visualiser le passage des particules chargées. Dans les chambres à brouillard, par exemple, la trajectoire se matérialise sous forme de gouttelettes de condensation, un peu comme la traînée laissée dans le ciel par le passage d'un avion à réaction. Dans de l'émulsion photographique très sensible, la trace d'une particule est constituée d'une succession de micro-cristaux d'argent qui, après développement, pourront être observés au microscope. De tels détecteurs sont accrochés à des ballons qui les transportent à haute altitude afin d'étudier le mystérieux rayonnement cosmique, ce flux de particules énergétiques, principalement des protons et des électrons, qui bombardent continuellement notre Terre. C'est dans les collisions de ces rayons cosmiques avec les noyaux des hautes couches atmosphériques que sont observées les premières particules "bizarres". On les baptise de lettres tirées principalement de l'alphabet grec, sans obéir à une logique claire : μ, π, K, Λ, … et on détermine leur masse, leur temps de vie, leurs modes de désintégration. Car toutes ces particules sont très éphémères, la plus "stable", le muon μ, ne vivant en moyenne que 2 millionièmes de seconde.

Les années 1950 voient la création aux Etats-Unis et en Europe de grands laboratoires équipés d'accélérateurs de plus en plus puissants. Finis les lâchers de ballons aux résultats aléatoires ! Les nouvelles particules peuvent maintenant être produites en abondance et de façon contrôlée. Les détecteurs deviennent de plus en plus sensibles, précis et volumineux. Et les découvertes s'accumulent. Aujourd'hui, plusieurs centaines de particules différentes ont été répertoriées et la revue qui, chaque année, publie le relevé de toutes leurs propriétés à l'épaisseur d'un annuaire téléphonique. Peu importe leur nom. Comme a dit le célèbre physicien Richard Feynman : "si on m'obligeait à retenir le nom de toutes ces particules, je me ferais botaniste ".

Leur spectre de masses couvre 11 ordres de grandeur, depuis les neutrinos dont la masse, si elle n'est pas strictement nulle, est au moins 100 000 fois plus petite que celle de l'électron jusqu'au "top" de 175 GeV/c^2, environ 200 fois la masse du proton ou 400 000 fois celle de l'électron.

4) Qu'y a-t-il dans un proton ?

Devant une telle floraison de particules, il devint rapidement évident qu'elles ne pouvaient toutes être considérées comme élémentaires mais plutôt comme des assemblages différents de constituants plus fondamentaux. Comment observer cette structure interne ? Pour observer des

objets très petits, il faut un microscope très puissant. Il est bien connu en optique que la taille minimum des objets que l'on peut distinguer est fixée par la longueur d'onde λ de la lumière utilisée pour les observer. Une des grandes victoires de la Mécanique Quantique fut d'établir l'équivalence entre les descriptions ondulatoire et corpusculaire de la lumière : une onde de fréquence $\nu = c/\lambda$ est aussi un flux de photons portant chacun une énergie E donnée la relation

$$E = h\,\nu = h\,c/\lambda$$

où $h = 6.6\ 10^{-34}$ Js est appelée constante de Planck.

Plus l'énergie E sera grande, plus la longueur d'onde λ sera petite et plus le microscope sera puissant. Cette relation n'est pas propre au photon mais se généralise à toute particule. Un électron d'une énergie de 1 MeV sera caractérisé par une longueur d'onde d'environ 10^{-12} m, soit 1 milliardième de mm, et un microscope électronique puissant permettra d'étudier la structure des molécules et de voir les atomes. Mais la taille d'un proton, d'environ 10^{-15} m, est encore bien inférieure et sa structure interne n'apparaîtra que s'il est bombardé par un faisceau de particules beaucoup plus énergétiques. Les grands accélérateurs sont aussi des super microscopes ! Grâce aux faisceaux de plusieurs centaines de GeV qu'ils produisent, on a pu mettre en évidence, au sein des protons et des neutrons, des "grains" beaucoup plus petits ($<10^{-18}$ m) baptisés du nom bizarre de quarks*.

5) Elémentaire, mon cher Watson !

La découverte des quarks a considérablement simplifié la classification des centaines de particules observées tout comme, un siècle plus tôt, la structure des atomes avait permis de comprendre le tableau de Mendeleev.

Quelles sont aujourd'hui les particules considérées comme élémentaires ? Elles sont présentées dans le tableau suivant :

	Famille 1	**Famille 2**	**Famille 3**

* Ce mot qui ne veut strictement rien dire fut inventé par l'écrivain irlandais James Joyce dans le roman "Finnegan's Wake" qui ne traitait pas du tout de physique des particules !

Leptons	ν_e e^-	ν_μ μ^-	ν_τ τ^-
Quarks	u (up) d (down)	c (charme) s ("strange")	t (top) b (bottom ou beauté)

Quelques explications sont nécessaires :

- A chacune des particules est associée une antiparticule de charge opposée. Par exemple, l'anti – u est noté $\bar{u}$ (prononcer "u barre").
- Chaque quark (ou antiquark) existe en 3 états différents appelés "couleurs". Ce terme a été choisi par analogie avec les 3 couleurs fondamentales, rouge, vert et bleu qui peuvent se combiner pour donner du blanc.
- Les leptons ne portent pas de couleur et ne sont pas sensibles à la force "forte" liée à l'échange de couleurs (voir plus loin). Toutes les particules composées observées jusqu'ici sont "blanches" c'est-à-dire quelles sont formées soit de 3 quarks de couleurs différentes soit d'un quark et d'un antiquark de couleurs opposées.
- On obtient un proton par la combinaison de quarks (uud) et un neutron par la combinaison (udd) en s'arrangeant pour répartir les 3 couleurs de façon symétrique. On voit donc que les particules composant la première famille suffisent à expliquer toutes les formes de matière habituelles. Le rôle des familles 2 et 3 reste un mystère. Il est limité au monde des grandes énergies ou des très hautes températures, que l'on ne rencontre qu'auprès des accélérateurs, dans l'explosion violente des étoiles ou pendant les premières secondes après le Big Bang.

A ce tableau, il convient d'en ajouter un deuxième, celui des bosons, les particules messagères qui transmettent les différents types de forces s'exerçant entre les particules.

	Masse	**Force transmise**
Photon γ	0	Électromagnétique
Gluon g (8 couleurs différentes)	0	Forte (entre les quarks)

Bosons W^+, W^- et $Z°$	80 GeV/c^2 91 GeV/c^2	Faible
Graviton (?)	0	Gravitation

Le photon nous est déjà familier. Selon son énergie, nous l'appellerons onde radio, micro-onde, infrarouge, lumière visible, rayon ultraviolet, X ou γ. C'est lui aussi qui s'échange entre le noyau et les électrons pour maintenir la cohésion des atomes.

Les gluons, comme leur nom l'indique, constituent la colle qui lie entre eux les quarks ou les antiquarks. C'est une colle tellement forte que l'on n'arrive pas à éjecter un quark hors d'un proton sans qu'immédiatement ce quark ne se recombine avec d'autres pour se "rhabiller" en particule "blanche". Alors que le photon est sensible à la charge électrique, les gluons sont sensibles à la charge de couleur des quarks. Pour faire face à toutes les combinaisons possibles de couleurs, ils forment une équipe de 8 !

La cohésion du noyau atomique résulte également de l'échange de gluons entre quarks appartenant à des protons et neutrons voisins.

Les bosons W et Z responsables de la force dite faible sont très massifs, ce qui explique que leur échange soit un processus peu probable (sauf à très haute énergie). Heureusement pour nous car ils participent, entre autre, aux réactions de fusion nucléaire au cœur du Soleil et, s'ils étaient plus actifs, notre astre aurait explosé depuis bien longtemps. Les neutrinos ne ressentent que la force faible. De là, leur caractère de fantômes passe-muraille : ce n'est que très, très rarement qu'un neutrino passera suffisamment près d'un quark pour pouvoir échanger avec lui un boson W ou Z.

Le dernier type de force, la gravitation, qui fait tomber les pommes, maintient les planètes autour du Soleil, gouverne l'évolution des galaxies et contrôle l'expansion de l'Univers, n'a par contre aucun effet détectable à l'échelle des particules. Son interprétation en termes quantiques d'échange de gravitons fait l'objet de nombreux travaux théoriques mais ne repose sur aucune base expérimentale. D'énormes appareils ultra sensibles, pourraient dans les prochaines années, détecter le passage d'ondes gravitationnelles issues d'événements cataclysmiques tels des collisions de galaxies ou des festins d'étoiles dévorées par des trous noirs géants.

Pour terminer, faisons le compte des "objets" élémentaires : 6 leptons, 18 quarks et leurs antiparticules soit 48. En y ajoutant les 13 bosons, on obtient un total de 61, ce qui (re)commence à faire désordre … L'histoire de l'infiniment petit n'est sans doute pas achevée.