

## «Le sixième et dernier quark»

*Universalis 1995, Encyclopædia Universalis Editeur\**

par Bernard PIRE  
Chercheur CNRS au Centre de Physique Théorique  
de l'École Polytechnique

---

Imaginé en 1963 pour expliquer la multiplicité croissante des particules élémentaires et la régularité apparente du nouveau tableau des éléments découverts grâce aux expériences utilisant les grands accélérateurs de particules, les quarks sont maintenant considérés comme les constituants ultimes de la matière. Avec les leptons et les bosons de jauge, ils forment l'alphabet avec lequel la nature écrit noyaux, atomes, molécules et tous leurs assemblages. La découverte au printemps 1994 de celui qui pourrait bien être le dernier quark - baptisé **top** - parachève une épopée à la fois théorique et expérimentale.

Que tout soit constitué d'atomes, que chacun de ces atomes soit un minuscule système solaire où autour d'un noyau chargé positivement «tourment» des électrons chargés négativement, que chacun de ces noyaux soit formé d'un nombre entier de protons et de neutrons (par exemple, l'isotope 238 de l'Uranium, noté  $^{238}_{92}\text{U}$ , possède 92 protons et 146 neutrons) est un acquis des premières décennies du XX<sup>e</sup> siècle. La compréhension de la structure des protons et des neutrons, étroitement liée à la résolution de la nature des interactions nucléaires fortes (par opposition aux interactions nucléaires faibles responsables des désintégrations radioactives  $\beta$ ) a dû attendre la mise en service des grands accélérateurs de particules capables de sonder la matière avec une précision meilleure que le femtomètre ( $10^{-15}$  m, soit un milliardième de micromètre).

### LA STRUCTURE DU PROTON

Les expériences réalisées auprès des premiers accélérateurs de particules dans les années 1950 et 1960 avaient montré que protons et

---

\* Nous remercions Encyclopædia Universalis qui nous a autorisé à reproduire cet article.

neutrons ont une taille de l'ordre du femtomètre. Mais le pouvoir de résolution de ces gigantesques «microscopes» n'était pas suffisant pour explorer plus finement la nature des protons et autres «hadrons», objets dont la caractéristique essentielle est leur sensibilité aux **interactions nucléaires fortes** : capables de surmonter la répulsion électrostatique, protons et neutrons s'assemblent dans les noyaux atomiques grâce à une force terriblement intense à courte portée mais complètement inefficace à quelques dizaines de femtomètres de distance.

La mise en service de l'accélérateur linéaire de Stanford en Californie allait illuminer le paysage. En bombardant des protons par des électrons d'énergie considérable (une vingtaine de milliards d'électron-Volts), les physiciens (dont Jerome FRIEDMAN, Henry KENDALL et Richard TAYLOR, prix Nobel de physique 1990 pour ces résultats) renouvelaient l'expérience qui avait permis à Rutherford de distinguer le noyau dans l'atome ; en 1967, ils observaient que les électrons frappant le proton étaient parfois violemment déviés, comme s'ils avaient heurtés des sous-constituants ponctuels. De fait, l'analyse spectroscopique des états excités des hadrons avait amené des théoriciens (dont Murray GELL MANN, prix Nobel de physique en 1969 pour cette découverte) à postuler l'existence de **quarks** auxquels on n'osait pas encore attribuer de réalité physique. Les expériences de Stanford dévoilaient la structure des protons, assemblages complexes de quarks chargés électriquement et d'une éventuelle «glu» mal définie. Mais le comportement de ces nouvelles particules apparaît paradoxal : fortement liés dans les protons, les quarks semblent oublier leurs liens (et leurs interactions) à l'intérieur de leur prison : en d'autres termes, l'interaction si forte à l'échelle du femtomètre devient inefficace à une échelle dix fois moindre.

## LA CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE

Les approfondissements théoriques des années 1970 allaient résoudre ce paradoxe. On s'était aperçu que l'électrodynamique quantique - que ses succès impressionnants pour décrire électrons et photons avaient solidement établie comme modèle de théorie fondamentale prédictive - découle d'un principe d'invariance par rapport à une symétrie abstraite dite de **jauge**. Faire une transformation de jauge, c'est pour employer une image retarder de soixante minutes toutes les horloges d'un pays pour passer de l'heure d'été à l'heure d'hiver. Imposer que la réalité ne soit pas modifiée (c'est-à-dire qu'il existe une symétrie de jauge) implique par exemple que la durée apparente de

certains vols internationaux augmente d'une heure. Au niveau subatomique, cette transformation agit sur la fonction d'onde, expression mathématique qui décrit la probabilité de présence d'une particule. Introduire un déphasage arbitraire dans la fonction d'onde des électrons et imposer que la réalité physique ne change pas, conduit alors à l'existence du champ électromagnétique, donc des photons et fixe de façon détaillée comment électrons et photons interagissent. Les photons sont donc issus d'un principe physique d'invariance par rapport aux transformations de jauge et on les appelle **bosons de jauge**. Les physiciens théoriciens ont proposé de généraliser ce principe d'invariance à des transformations qui de plus échangeraient des particules groupées à l'intérieur d'un multiplet. Une telle démarche s'est révélée extraordinairement fructueuse puisqu'elle permit d'écrire diverses théories physiquement réalisables.

La théorie de la **chromodynamique quantique** groupe ainsi en triplets les quarks, chaque quark apparaissant sous trois «couleurs» possibles : rouge, vert ou bleu. Les bosons de jauge résultant du principe d'invariance sont alors huit **gluons**, capables de changer la couleur d'un quark (voir tableau 3). Le proton est alors formé d'une superposition d'états composés de quarks, d'antiquarks et de gluons liés fortement entre eux. Protons et neutrons sont des mélanges *blancs* de constituants colorés, dans le même sens que la lumière blanche est une superposition des couleurs de l'arc-en-ciel. Cette théorie, maintenant vérifiée par l'adéquation de nombre de ses conséquences à des mesures expérimentales, possède la remarquable propriété de liberté *asymptotique* : lorsqu'on éloigne deux quarks l'un de l'autre, leur attraction mutuelle croît à cause d'un phénomène surprenant d'anti-écranage dû au fait que les gluons sont eux-mêmes colorés ; l'interaction tenue à courte distance devient ainsi extraordinairement intense à l'échelle du femtomètre ; inversement les quarks solidement liés à l'intérieur du proton réagissent comme des particules quasi-libres lorsque un projectile très énergétique vient sonder leur comportement à l'intérieur de leur prison : exactement le comportement paradoxal observé expérimentalement à Stanford.

## LA DEUXIÈME ET LA TROISIÈME GÉNÉRATIONS DE QUARKS

C'est dans les années 1970 également que l'application du principe d'invariance de jauge à l'interaction électrofaible, mariage de l'électrodynamique et des interactions nucléaires faibles montra que les quarks devaient de plus être groupés en doublets, les deux premiers couples

étant constitués de quarks (d, u) et (s, c) respectivement ; les leptons (électrons, neutrinos...), particules insensibles aux interactions fortes et donc dépourvues de couleur, étant aussi appariés. La découverte en 1977 du quark b (pour bottom) indiquait qu'au moins trois «générations» de quarks existent, comme c'est le cas pour les leptons.

	Quarks	Leptons	Bosons de jauge
Première génération	d, u	e, $\nu_e$	un photon : $\gamma$
Deuxième génération	s, c	$\mu$ , $\nu_\mu$	trois bosons faibles : $W^\pm$ , Z
Troisième génération	b, t	$\tau$ , $\nu_\tau$	huit gluons : g

**Tableau 1** : Les vingt-quatre particules élémentaires.

Bien que le nombre de particules soit très mal compris, les physiciens s'accordent à penser que trois générations suffisent. Les expériences menées récemment au collisionneur LEP d'électrons et de positrons du CERN près de Genève ont en effet pu compter le nombre de neutrinos dont la masse est inférieure à une cinquantaine de fois la masse du proton. Tous les neutrinos connus ayant une masse nulle ou en tous cas minuscule, on estime que le nombre trouvé - trois - est aussi le nombre de générations de quarks et de leptons. La découverte du quark t (appelé top) était donc attendue pour compléter le tableau des vingt-quatre particules élémentaires (voir tableau 1). La hiérarchie de masses des cinq premiers quarks (voir tableau 2) reste à ce jour incompréhensible et on ne pouvait donc pas facilement prédire quelle était l'énergie nécessaire à la production d'un quark top.

L'existence de trois générations (et donc de six quarks) heurte ce qu'on pourrait appeler un principe d'économie et certains physiciens ont proposé que cela soit un signe du caractère non élémentaire des quarks, qui seraient à leur tour des états liés d'autres éléments plus fondamentaux. Aucune vérification expérimentale n'est venue étayer ce scénario en «poupées russes».

	d	u	s	c	b	t
Masse (approximative)	0,010	0,005	0,15	1,5	5	170
Charge électrique	- 1/3	2/3	- 1/3	2/3	- 1/3	2/3
États de spin	↑ ou ↓					
États de couleur	«rouge», «vert» ou «bleu»					

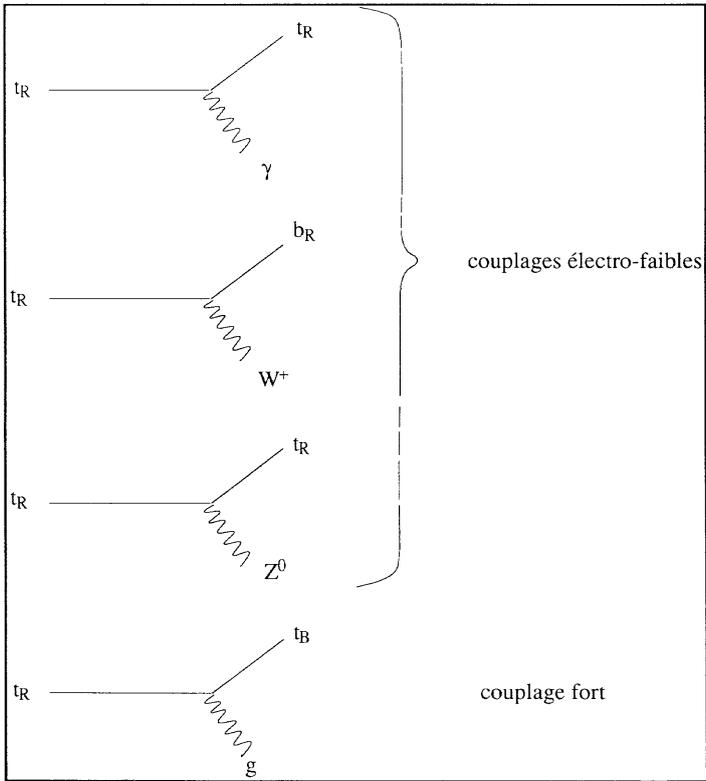
**Tableau 2** : Les propriétés des quarks. Les masses sont en  $\text{GeV}/c^2$  (le proton a une masse de  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ ), les charges en unité de charge du proton ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

Une justification à cette répétition des générations pourrait venir d'un subtil déséquilibre entre matière et antimatière observé expérimentalement dans certaines désintégrations et auquel on doit peut-être l'existence de l'univers - qui ne semble aucunement composé d'autant de matière que d'antimatière.

## LA DÉCOUVERTE DU QUARK TOP

La construction du TÉVATRON du laboratoire FERMI près de Chicago a permis d'atteindre des énergies record de plusieurs billions d'électrons Volts (des Tera-électron-Volts ou TeV, d'où le nom de l'accélérateur) dans des collisions de protons et d'antiprotons. La violente collision des quarks, des antiquarks et des gluons constituant ces paires de quark  $t$  - antiquark  $t$ . Détecter et reconnaître l'éphémère apparition de ces nouveaux états restait un défi. Groupés en deux grandes collaborations, plusieurs centaines de physiciens, américains en majorité mais aussi européens et asiatiques, ont joint leurs intelligences et leurs budgets pour réaliser deux énormes ensembles de détection contrôlés par une électronique et une informatique n'ayant rien à envier aux programmes spatiaux.

Le mode de désintégration dominant du quark top découle naturellement de son appariement théorique avec le quark bottom : un quark  $t$  se transforme très rapidement en un quark  $b$  et une particule vecteur de l'interaction faible, le boson  $W$ . Mais ces particules elles-mêmes se désintègrent à leur tour en une multitude d'états finals complexes et différents. Pour «observer» le quark top éventuellement produit, on doit donc appliquer sur un ensemble de données brutes suffisamment riche toute une série de critères de sélection aptes à isoler quelques événements caractéristiques de la présence de nouveaux quarks. A partir de quelques centaines de milliards d'interactions entre les protons et les antiprotons, les physiciens ont ainsi isolé douze événements. Une analyse statistique sophistiquée leur a ensuite permis d'estimer le nombre de fois où un «fond» d'événements connus grâce à des expériences antérieures mimait le signal attendu. Il en ressort que cinq de ces douze événements pourraient être fallacieux. La probabilité que l'on ait observé un phénomène nouveau - à savoir la production du quark top et sa désintégration - est alors estimée à 99 %.



**Tableau 3 :** Quelques exemples de couplages élémentaires du quark top. L'indice R ou B spécifie la couleur des quarks.

Une des deux collaborations du Tévatron a annoncé en mai 1994 cette découverte après avoir analysé les données accumulées pendant deux ans. La deuxième équipe a confirmé ce résultat début 1995. Malgré la prudence d'usage dans les écrits scientifiques (dans leur publication dans la revue de la Société Américaine de Physique, les auteurs écrivent que leur analyse indique mais n'établit pas l'existence du quark top) la communauté internationale s'accorde à saluer la découverte du dernier quark. Mais cela ne signifie nullement que les physiciens sub-nucléaires considèrent leur domaine de recherche comme un champ clos. Quelques questions fondamentales restent en effet sans réponse, pour lesquelles de nouveaux projets d'accélérateurs attendent approbation et financement internationaux.

## QUESTIONS OUVERTES ET PROJETS EXPÉRIMENTAUX

La masse des particules, celle des quarks en particulier, n'est pas explicable actuellement. Outre que l'on veut comprendre pourquoi les particules fondamentales observées ont des masses si différentes les unes des autres, on aimerait pouvoir décrire mathématiquement comment les particules acquièrent une masse, par exemple en interagissant avec un état complexe du «vide» physique, comme dans le mécanisme dit «de Higgs», où une nouvelle particule fondamentale au moins (*le boson de Higgs*) apparaît. C'est pour éclairer ce problème que les physiciens européens ont obtenu la construction d'un grand collisionneur de protons (le LHC, large hadron collider) au CERN près de Genève, les Américains ayant vu leur ambitieux projet texan (le SSC, superconducting super collider) refusé par les parlementaires.

Comment les quarks s'assemblent-ils pour former protons et neutrons ? Ce mécanisme du confinement est aussi mal compris que son pendant, le phénomène du déconfinement des quarks et des gluons à haute température, amenant à l'apparition d'une nouvelle phase de la matière. Pour soulever un peu le voile de ce mystérieux et complexe processus d'assemblage, les physiciens européens proposent de construire un accélérateur à haut flux d'électrons pouvant sonder la matière nucléaire : c'est le projet ELFE (Electron Laboratory For Europe). Leurs collègues américains proposent quant à eux d'accélérer des ions lourds et de les faire entrer en collision pour reproduire le plasma de quarks et gluons déconfinés qui aurait rempli l'univers lors de sa première microseconde : c'est le projet RHIC (relativistic heavy ion collider) en construction dans l'île de Long Island près de New-York.

Lors de leurs interactions faibles, les quarks se mélangent selon un processus quantique de superposition d'états. Comprendre ce mélange et en particulier les phases complexes (dans le sens mathématique de ce mot) responsables d'effets liés à l'asymétrie entre matière et antimatière, est le but de collisionneurs à électrons et positrons de haut flux, appelés «usines à quarks b», en construction en Californie et au Japon.

Il se pourrait enfin que toutes les particules connues aujourd'hui - du photon au quark top - aient un partenaire «supersymétrique». Nombre de théoriciens pensent en effet que la Nature respecte une symétrie d'un nouveau type, une supersymétrie qui relierait des particules de spin différent. L'observation d'au moins une de ces

**sparticules** (sic) nécessite des accélérateurs plus puissants que le Tévatron, le LHC par exemple.

#### **BIBLIOGRAPHIE**

- M. JACOB : *La grammaire de la matière*, La Science au Présent (Encyclopædia Universalis 1992).
- J.-P. PHARABOD et B. PIRE : *Le Rêve des Physiciens*, (Odile Jacob 1993).
- M. CROZON : *La Matière première* (Points Seuil).
- M. CROZON et F. VANNUCCI : *Les Particules élémentaires* (Que sais-je ?).
- E. KLEIN : *Sous l'atome, les particules* (Flammarion, Dominos).
- J.-P. BATON et G. COHEN-TANNOUJJI : *L'Horizon des Particules* (Gallimard, 1989).