

exister, mais il fut particulièrement difficile à trouver. Bien qu'il s'agisse d'une particule fondamentale, sans structure apparente, le quark *top* possède une masse de 175 milliards d'électronvolts/ c^2 (GeV/ c^2), égale à celle d'un atome d'or et bien supérieure à la plupart des prévisions (l'électron-volt est une unité d'énergie, reliée à la masse par la relation $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière). Le proton, composé de deux quarks *u* et d'un quark *d*, possède une masse légèrement inférieure à un GeV/ c^2 .

Des collisions par milliards

Pour créer un quark *top*, on devait donc concentrer une quantité considérable d'énergie dans une minuscule région de l'espace : c'est ce que font les physiciens quand ils accélèrent deux particules avant de les projeter l'une contre l'autre. Les expérimentateurs espéraient que, parmi les milliers de milliards de collisions provoquées, quelques-unes produiraient un quark *top*. À quelle énergie ? Le Modèle standard prédisait de nombreuses propriétés du quark *top*, comme sa charge électrique et son spin (ou moment cinétique intrinsèque), mais pas sa masse. La quête était hasardeuse...

Bien que les particules puissent être créées à partir d'énergie pure, certaines propriétés, comme la charge électrique, sont conservées : dans une collision, la charge électrique totale des particules est égale avant et après la collision. Un quark *top* ne peut naître par lui-même. La façon la plus simple de produire ce quark est de le créer avec son antiparticule, l'antiquark *top* : ce dernier possède la même masse que le *top*, mais le signe de toutes les autres propriétés est opposé, de sorte que toutes les quantités conservées s'annulent.

En 1985, quand le collisionneur du Laboratoire Fermi fut mis en service pour la première fois, la recherche du quark *top* avait commencé depuis huit ans. Les premières tentatives, menées au Collisionneur linéaire de Stanford, en Californie, et au Laboratoire DESY de Hambourg, n'avaient pas abouti. Au fil des ans, à mesure que les physiciens construisaient des accélérateurs plus puissants, la quête se poursuivait. Au début des années 1980, au CERN (le Laboratoire européen de physique des particules, près de Genève),

les collisions de faisceaux de protons et d'antiprotons de 315 GeV avaient engendré deux nouvelles particules : les bosons *W* et *Z*.

Tandis que les quarks et les leptons constituent la matière, ces particules véhiculent les forces entre particules, telle la force nucléaire faible, responsable de certaines désintégrations radioactives. Leur découverte renforçait le Modèle standard, qui avait cor-

rectement prédit leurs masses. On pensait alors que la découverte du quark *top* au CERN était imminente.

Ce fut plus difficile qu'on ne l'imaginait. À haute énergie, lors d'un choc entre des protons et des antiprotons, la collision se déroule entre leurs quarks et gluons constitutifs. Ainsi, chaque quark ou gluon n'a qu'une petite partie de l'énergie totale du proton ou de l'antiproton, et la collision doit être suf-

CONSTITUANTS DE LA MATIÈRE										CHARGE
QUARKS	MASSE (GeV/c ²)	 UP 0,3	 CHARM 1,5	 TOP 175	$+\frac{2}{3}$					
	MASSE (GeV/c ²)	 DOWN 0,3	 STRANGE 0,5	 BOTTOM 4,5		$-\frac{1}{3}$				
LEPTONS	MASSE (GeV/c ²)	 ÉLECTRON 0,0005	 MUON 0,106	 TAU 1,7	-1					
	MASSE (GeV/c ²)	 NEUTRINO ÉLEC- TRONIQUE 0?	 NEUTRINO MUONIQUE 0?	 NEUTRINO TAUIQUE 0?	0					

PARTICULES VÉHICULANT LES FORCES						
	BOSONS VECTEURS			PHOTON	GLUON	
	 W ⁺	 W ⁻	 Z ⁰	 γ	 g	
	MASS (GeV/c ²)	80	80	91	0	0
	CHARGE	+1	-1	0	0	0
FORCE		FAIBLE	FAIBLE	FAIBLE	ÉLECTRO- MAGNÉTIQUE	FORTE

Le monde selon le Modèle standard

La matière est formée de deux types de particules : les quarks et les leptons, groupés en familles. Les quarks *u* et *d*, par exemple, forment les atomes avec les électrons ; ils appartiennent à la première famille. Les quarks plus lourds, tels le *top* et le *b*, ne sont créés que dans les accélérateurs. À chaque quark ou lepton correspond un antiquark ou un antilepton de charge opposée (non représentés).

Les forces sont transmises par un ensemble différent de particules : les bosons *W* et *Z*, le photon et les gluons. Les bosons *W* et *Z* transmettent la force nucléaire faible, en jeu dans les désintégrations radioactives. Par exemple, un quark *u* peut se transformer en un quark *d* en émettant un boson *W*, qui se désintègre alors en un quark ou en une paire de leptons. Le photon transmet la force électromagnétique, laquelle, à haute énergie, se confond avec la force faible. Les gluons transportent la force nucléaire forte, qui lie les quarks *u* et *d* en protons et en neutrons. Les physiciens croient à l'existence d'une particule supplémentaire, le boson de Higgs, mais ils ne l'ont pas encore découverte.

fisamment énergétique pour produire des quarks *top*. De telles collisions sont rares, et plus l'énergie nécessaire est élevée – c'est-à-dire plus la masse du quark *top* est grande –, plus elles sont rares.

Fin 1988, le CERN n'avait toujours pas observé le quark *top*, de sorte que sa masse était supérieure à $41 \text{ GeV}/c^2$. Entre-temps, le collisionneur proton-antiproton du Laboratoire Fermi (Tevatron) entra en service avec son détecteur CDF (l'acronyme de *Collider Detector at Fermilab*, soit «Détecteur de collisions du Laboratoire Fermi»). Malgré une brève et intense compétition entre nous et un groupe du CERN, la décennie 1980 s'acheva sans que le *top* apparaisse ; on savait seulement que sa masse était supérieure à $77 \text{ GeV}/c^2$.

À cette époque, le CERN avait atteint sa limite : il ne pouvait trouver le quark *top* si sa masse était supérieure à $77 \text{ GeV}/c^2$. En revanche, une autre équipe fut chargée d'un second détecteur, de l'autre côté de l'anneau du Laboratoire Fermi, nommée DØ (prononcez D-zéro) en raison de sa position le long de l'anneau. Dès 1992, la collaboration DØ commença à accumuler des données. Non seulement le fonctionnement des deux détecteurs créait une émulation bénéfique, mais les deux groupes pouvaient confronter leurs résultats et les vérifier.

Les expériences CDF et DØ sont deux collaborations internationales de

plus de 400 physiciens, auxquels s'ajoutent de nombreux ingénieurs, techniciens et personnels de soutien. Les deux équipes sont indépendantes et ne collaborent jamais aux analyses. Entre ces deux collaborations une compétition amicale s'est instaurée.

Conformément à une règle implicite, les résultats des analyses ne sont pas discutés en dehors de chaque groupe tant que les analyses ne sont pas terminées. Cependant, comme au moins trois physiciens ont un conjoint dans l'autre équipe, le secret dans la recherche du quark *top* paraissait difficile. Afin d'éviter les rumeurs, nous étions convenu que si l'un des groupes était sur le point de faire une annonce importante, il avertirait l'autre une semaine à l'avance. En nous fondant sur les meilleurs calculs théoriques, nous avions prévu qu'environ une collision sur dix milliards produirait un quark *top*. Le détecteur doit être suffisamment sensible pour extraire ces événements rares des différentes sources de bruit de fond.

Dix ans durant, les collaborations CDF et DØ ont construit d'énormes instruments, avec des centaines de milliers de canaux électroniques, afin d'identifier la «signature» du *top*, c'est-à-dire la trace qu'il laisserait dans le détecteur. Le détecteur CDF suit avec précision les particules individuelles dans un champ magnétique (en vue de mesurer leurs quantités de mouvement). La détection avec DØ est fon-

dée sur un calorimètre segmenté, qui mesure avec précision l'énergie de chaque collision.

Aussitôt produits, le quark *top* et son antiparticule se désintègrent. Contrairement aux quarks *u* et *d*, qui sont stables, le quark *top* a une durée de vie d'un millionième de milliardième de milliardième de seconde (10^{-24} seconde). Le Modèle standard prédit que, si le quark *top* est suffisamment lourd, il se désintègrera presque toujours en un boson *W* et en un quark *b*. Ainsi, la création d'un quark *top* conduit à deux bosons *W*, un quark *b* et un antiquark *b*.

Malheureusement, ni les bosons *W* ni les quarks *b* ne sont observables directement. La durée de vie du boson *W* est analogue à celle du quark *top*. Le quark *b* est lui aussi instable, bien qu'ayant une vie moyenne plus longue que celle du *top*. En outre, des quarks isolés – ou «nus» – ne sont jamais observés : en raison de la force nucléaire forte qui lie les quarks, ceux-ci apparaissent toujours couplés à d'autres quarks ou à des antiquarks. Les quarks sont ainsi rassemblés par paires, nommées mésons, ou par triplets, nommés baryons (les protons et les neutrons, par exemple, sont des baryons). Lorsqu'un quark est créé lors d'une collision, il «s'habille» d'un nuage de quarks et d'antiquarks. On observe alors un jet de particules qui se meuvent à peu près dans la même direction que le quark originel.

