

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.

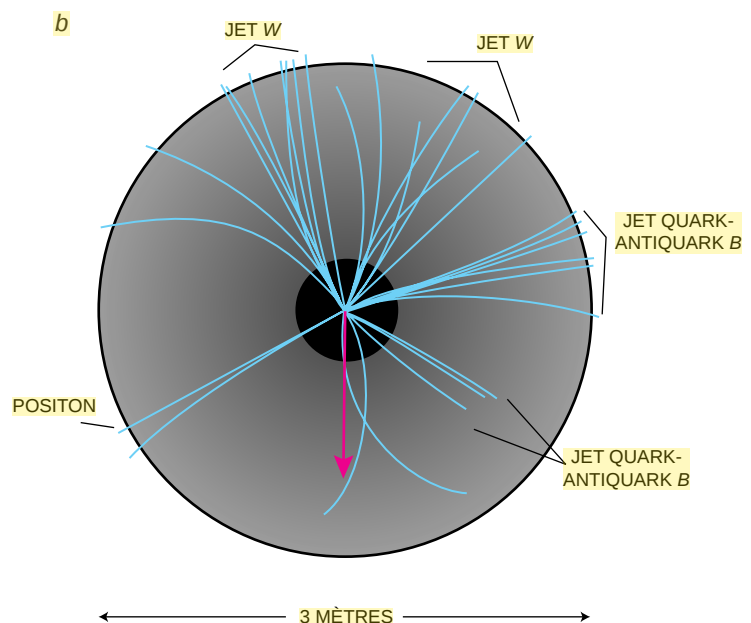
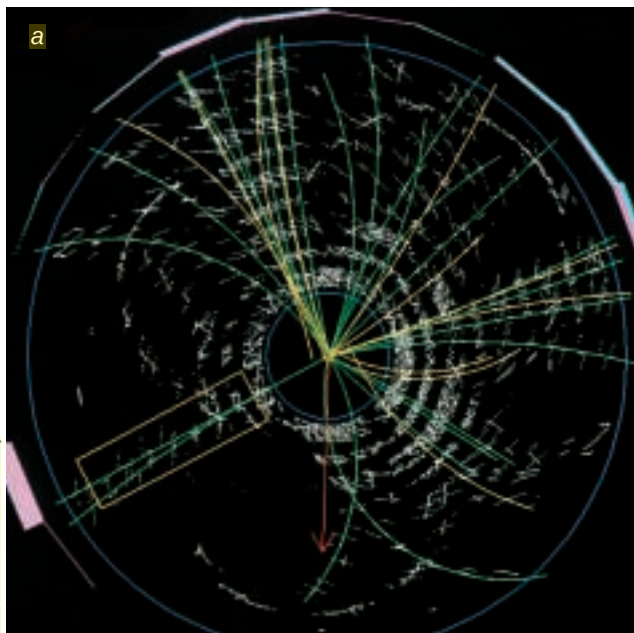
Conformément à une règle implicite, les résultats des analyses ne sont pas discutés en dehors de chaque groupe tant que les analyses ne sont pas terminées. Cependant, comme au moins trois physiciens ont un conjoint dans l'autre équipe, le secret dans la recherche du quark *top* paraissait difficile. 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 désintégrera 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.



Des jets partout

Le boson W peut se désintégrer en un quark et un antiquark de la même famille, comme un quark u et un antiquark d . Dans ce cas, le quark et l'antiquark se présentent dans un détecteur de particules sous la forme de deux jets. Cependant, le boson W peut aussi se désintégrer par la voie «leptonique», en un lepton chargé et un lepton neutre de la même famille, par exemple un électron et un neutrino.

Si le lepton chargé est un électron ou un muon (analogue à l'électron, mais plus massif), il peut directement être observé dans le détecteur. Toutefois, si c'est un tau (une version encore plus lourde de l'électron), il se désintègre assez rapidement, ce qui le rend difficile à identifier. D'autre part, le neutrino (dont la masse est nulle ou très petite) qui accompagne le lepton n'est pas détecté, car il interagit avec la matière par l'intermédiaire de la force faible. On détermine sa présence indirectement, car il emporte une partie de la quantité de mouvement de la collision : lorsque l'on additionne les quantités de mouvement de toutes les particules vues dans le détecteur et que l'on observe une diminution notable de la quantité de mouvement, après la collision, on suppose qu'elle a été emportée par un neutrino.

En août 1992, nous avons repoussé la masse minimale du quark top à $91 \text{ GeV}/c^2$. C'était un progrès impor-

tant, parce qu'il nous aidait à trouver le quark top . En effet, le boson W véhicule les forces entre quarks de la même famille, comme entre le top et le b . Ainsi ces particules sont couplées et peuvent se désintégrer les unes en les autres. Si le quark top avait été léger – moins de $75 \text{ GeV}/c^2$ environ –, un boson W , dont la masse est égale à $80 \text{ GeV}/c^2$, aurait pu se désintégrer en un quark top et un antiquark b . Nous savions alors que la seule manière de produire un quark top était de créer une paire quark-antiquark top .

L'une des caractéristiques d'une telle production est la présence de jets provenant des quarks b . Le quark b est éjecté avec d'autres particules qui constituent un méson ou un baryon, et il se désintègre un demi-millimètre après son point de création. En 1992, nous avons commencé à suivre précisément la trace des particules des jets en utilisant un instrument placé près de la région de collision des faisceaux (voir *Les détecteurs de particules en silicium*, par Alan Litke et Andreas Schwarz, *Pour la Science*, juillet 1995). Ce «détecteur de vertex» localise la trace d'une particule à 15 micromètres près (on nomme vertex le point de production des particules). En identifiant la plupart des traces dans un jet et en les extrapolant vers l'origine, nous espérons découvrir le point de désintégration du quark b et identifier ainsi le jet comme provenant d'un quark b .

À l'époque, la technique des détecteurs en silicium était neuve, et nous

redoutions l'impact des milliards et des milliards de particules à travers le détecteur. Nous savions que le détecteur tout entier grillerait en une fraction de seconde si un incident dans l'accélérateur projetait le faisceau dessus. Aussi avons-nous conçu un dispositif de protection qui écarterait le faisceau du silicium en cas de problème. Alors même que nous apprenions à nous servir du nouveau détecteur de vertex, l'équipe DØ mettait en service son nouveau détecteur, de l'autre côté de l'accélérateur.

En octobre 1992, à peine trois mois plus tard, nous apercevions le premier indice de la présence du quark top : une collision avait engendré un muon et un électron très énergiques, au moins deux jets, avec une quantité de mouvement totale qui avait beaucoup diminué. Nous avons analysé cet événement dans ses moindres détails et conclu qu'il provenait probablement de la désintégration d'un quark top . L'équipe DØ avait également observé un événement similaire, dont l'interprétation la plus probable était la présence d'un quark top . Cependant, un seul événement ne suffisait pas. Il nous fallait observer le quark top de diverses manières, afin de vérifier que nous n'étions pas en présence d'un bruit de fond reproduisant aléatoirement la signature du quark top . Nous avons alors poursuivi l'analyse de nouvelles données encore plus méticuleusement, mais, devant

La naissance d'un quark top

Un proton et un antiproton voyageant en sens opposé le long de la ligne de faisceau (perpendiculairement à la page) se heurtent au centre du Détecteur de collisions du Laboratoire Fermi (CDF) (a). L'impact produit quatre jets (b) et quelques autres particules isolées. Deux jets, identifiés par un détecteur de vertex au silicium, proviennent de la désintégration d'un quark b et d'un antiquark b , tandis que deux jets résultent de la désintégration d'un boson W en un quark et un antiquark. Un positon énergétique est produit par une autre désintégration de boson W en compagnie d'un neutrino invisible (flèche rouge). Des jets multiples associés à un positon indiquent la désintégration possible d'un quark top .

Un champ magnétique parallèle au faisceau courbe les trajectoires des particules chargées : la direction de courbure donne le signe de la charge de la particule, et le rayon de courbure indique sa quantité de mouvement. En outre, un calorimètre qui entoure la ligne du faisceau mesure les énergies des particules émergentes. Ses résultats sont représentés en (c). La hauteur d'un bloc indique l'énergie libérée par les particules dans le segment du calorimètre correspondant. La combinaison des dispositifs permet aux expérimentateurs de reconstruire l'événement originel (représenté page 68).

