

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 GeV/c². 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 GeV/c² environ –, un boson W , dont la masse est égale à 80 GeV/c², 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 espérions 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

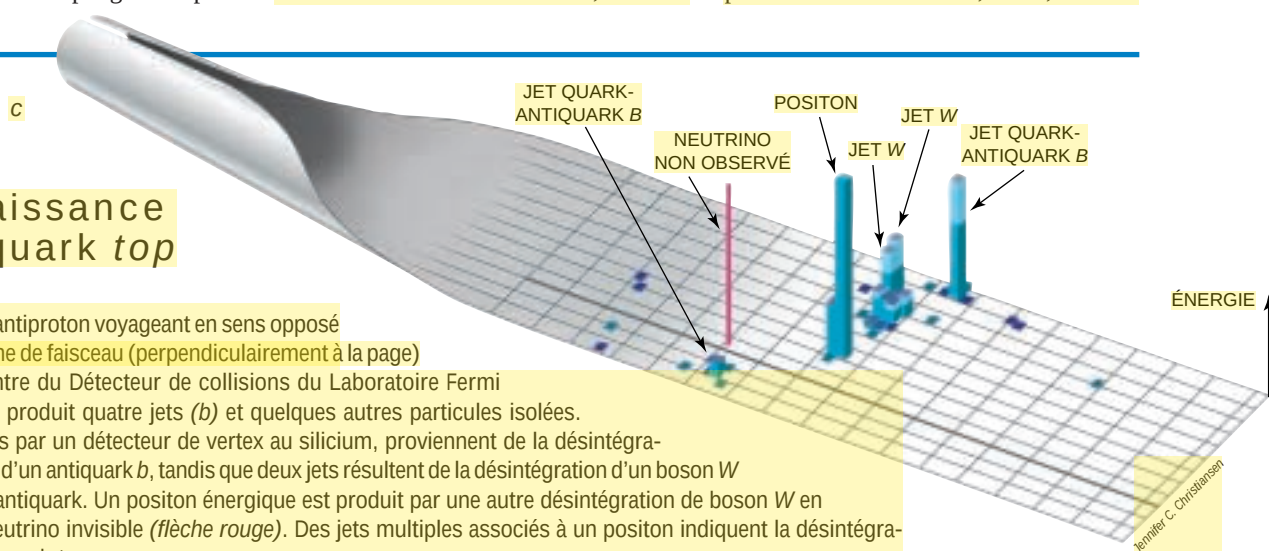
redoutions l'impact des milliards et des milliards de particules à travers le détecteur. Nous savions que le détecteur tout entier grillerait en une fraction de seconde si un incident dans l'accélérateur projetait le faisceau dessus. Aussi avons-nous conçu un dispositif de protection qui écarterait le faisceau du silicium en cas de problème. Alors même que nous apprêtions 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).



Une masse prévue

Pendant près de 20 ans, le quark *top* a été l'une des pièces manquantes du Modèle standard de la physique des particules. Après la découverte de son partenaire, le quark *b*, en 1977, les recherches entreprises dans des accélérateurs d'énergies de plus en plus élevées sont restées infructueuses, ce qui indiquait une masse de plus en plus élevée pour le quark *top* (la gamme de masse couverte par un accélérateur est limitée par son énergie).

En parallèle des recherches directes, l'interprétation théorique de nombreuses mesures effectuées avec d'autres accélérateurs (dont le collisionneur électron-positon LEP du CERN) a permis de cerner la masse du quark *top* : même s'il n'apparaît pas directement dans la désintégration des bosons *W* et *Z*, il intervient de manière virtuelle. Ainsi, en mesurant précisément la masse du boson *W* et du *Z* et leur probabilité de désintégration en différentes particules, on estime indirectement la masse du quark *top*.

Dans le cadre du Modèle standard, ces interprétations indiquaient un intervalle de masse accessible au collisionneur proton-antiproton du laboratoire Fermi, le Tevatron. La masse estimée se situait en effet entre 140 et 200 GeV/c², et l'énergie des faisceaux du Tevatron (900 GeV par faisceau) est suffisante pour produire des quarks de cette masse. Dans le Tevatron, cette énergie est atteinte à l'aide de dipôles supraconducteurs dont le puissant champ magnétique courbe les faisceaux dans un accélérateur circulaire de 6,28 kilomètres de circonférence.

Finalement, après les premières indications obtenues en 1994, la découverte du quark *top* a été annoncée officiellement en 1995 par les deux expériences fonctionnant sur le Tevatron, CDF et DØ. Pour obtenir quelques dizaines d'événements où un quark *top* a été détecté, il a été nécessaire d'observer plusieurs milliers de milliards de collisions entre protons et antiprotons car la production du quark *top* dans ces collisions est un phénomène rare. Pour extraire cette aiguille de

la botte de foin de toutes les collisions, il a fallu utiliser des traitements élaborés. Le nombre de collisions est tel qu'on ne les enregistre pas toutes : l'analyse en temps réel présélectionne les données intéressantes en utilisant toutes les possibilités des détecteurs. Les données sont ensuite exploitées par une analyse «hors-ligne».

Les détecteurs sensibles et compliqués, dont la taille est de l'ordre d'une dizaine de mètres et dont certains éléments permettent de mesurer les points de passage des particules à la dizaine de micromètres près, ont été construits par des collaborations internationales regroupant plusieurs centaines de physiciens provenant de différents continents. Un groupe français, du Commissariat à l'énergie atomique de Saclay, a ainsi participé à l'expérience DØ pour la construction d'une partie du système d'identification des traces.

Avec les données accumulées auprès du Tevatron entre 1992 et 1996, certaines caractéristiques du quark *top* ont été mesurées, et sont en accord avec les prévisions théoriques. Des mesures plus précises seront effectuées lors de la prochaine campagne de prises de données du Tevatron, qui commencera en 1999, et se poursuivront dans le collisionneur proton-proton du CERN, le LHC, dont le démarrage est prévu en 2005. Cet accélérateur devrait aussi permettre d'étudier un des aspects les plus méconnus de Modèle standard, qui est l'origine de la masse des différentes particules, notamment en cherchant le boson de Higgs. Après la découverte du quark *top*, ce boson de Higgs reste la seule particule prédite par le Modèle standard encore non observée à ce jour. La masse élevée du quark *top*, par rapport aux autres particules de matière, indique que celui-ci jouerait également un rôle particulier dans l'origine de la masse des particules.

Guillaume UNAL,
Laboratoire de l'accélérateur
linéaire, Orsay.

l'absence de résultats spectaculaires, nous savions que ce serait un travail de longue haleine.

Trois équipes analysaient les données fournies par le détecteur CDF. Notre premier candidat quark *top* fut découvert par un groupe qui recherchait les événements à deux leptons (issus de la désintégration de deux bosons *W*) et à au moins deux jets (provenant probablement des quarks *b*). Les deux autres groupes examinaient les événements à un lepton (désintégration d'un boson *W*) accompagné de jets (émanant de la désintégration de l'autre boson *W* et de quarks *b*). Ces deux équipes utilisaient des méthodes différentes : l'une employait les signaux de la chambre de vertex pour identifier les jets de quarks *b* ; l'autre recherchait les leptons de faible énergie, un signe révélateur de la désintégration d'un quark *b*.

Après un peu moins d'un an d'expérimentation, la limite de masse était poussée à 108 GeV/c² par l'équipe CDF et plus tard à 131 GeV/c² par l'équipe DØ, et nous étions toujours en train de chercher. Puis, en juillet 1993, lors d'une réunion de toute l'équipe CDF, les trois groupes présentèrent les résultats de leurs analyses en cours. Elles étaient très ambiguës individuellement, mais, mises ensembles, elles offraient un indice probant de l'existence du quark *top*. L'un de nous (P. Tipton) devait bientôt se rendre à une conférence et présenter nos derniers résultats, mais nous avons jugé que cela serait prématuré, car la communauté des physiciens conclurait que nous possédions de fortes indications de l'existence du quark *top* et demanderait à les vérifier. P. Tipton présenta donc seulement nos méthodes et les difficultés rencontrées dans la quête du *top*, sans mentionner les derniers résultats. Les rumeurs qui circulèrent alors immanquablement s'amplifièrent quand nous annulâmes un exposé prévu pour une conférence importante, au printemps 1994.

Parmi les milliers de milliards de collisions provoquées dans le détecteur CDF, nous avons isolé 12 événements qui semblaient provenir de la désintégration d'une paire quark-antiquark *top*. Comme d'autres mécanismes physiques ont une signature analogue, nous devions en estimer la probabilité. Après des mois d'efforts, nous avons calculé que 5,7 de ces événements devaient être des parasites. La probabilité que seul le bruit de fond