

bosons de Higgs et deviennent massifs ; simultanément, les quarks et les leptons acquièrent également une masse.

Toutefois, tandis que les masses du boson W et du Z sont prédites par le Modèle standard, les physiciens doivent mesurer les masses des quarks et des leptons pour les décrire théoriquement : ils ajustent des paramètres qui décrivent l'intensité du «couplage» de chaque type de quark et de lepton avec le boson de Higgs.

Pour un électron, très léger, l'intensité de l'interaction est égale à 3×10^{-6} ; pour un quark *top*, elle est voisine de un. Ce couplage relativement fort avec le boson de Higgs et, dans une certaine mesure, la mystique associée à la valeur un, indiquent que le quark *top* jouerait un rôle particulier, mais lequel ?

En raison de sa masse élevée, le quark *top* est certainement le plus influent, en termes de ses interactions avec les autres particules. Une mesure précise de la masse du quark *top* et de la masse du boson W conduirait à une prédiction de la masse du boson de Higgs.

Certaines descriptions de la brisure de symétrie électrofaible ne font pas apparaître de boson de Higgs. Notamment l'une de ces théories parallèles le remplace par une paire quark-antiquark *top*. S'il existe ainsi des particules lourdes qui se désintègrent en paires quark-antiquark, on devrait observer plus de quarks *top* qu'on n'en attend dans le cadre du Modèle standard.

Le top du top

Avec sa forte masse, le quark *top* devrait se désintégrer en nouvelles particules. Certains théoriciens ont proposé que quelques-uns des événements enregistrés par le détecteur CDF contiennent des particules supersymétriques (voir *La nature est-elle supersymétrique ?*, par Howard Haber et Gordon Kane, *Pour la Science*, août 1986). La supersymétrie est une symétrie postulée qui attribue à toute particule du Modèle standard des partenaires encore non découverts. Si ces partenaires existent et sont plus légers que le quark *top*, ils pourraient apparaître dans les événements que nous avons identifiés. Par exemple, un quark *top* peut se désintégrer en son partenaire supersymé-

trique (le «*stop*»), tandis qu'un «*gluino*» (le partenaire hypothétique du gluon) se désintégrerait en une paire *top-stop*. Aujourd'hui, les possibilités sont variées : si l'augmentation du nombre de quarks *top* due au second mécanisme était compensée par la raréfaction due au premier mécanisme, on n'observerait pas plus, ni moins de quarks et d'antiquarks *top* que le Modèle standard n'en prévoit.

La supersymétrie ne prédit pas l'existence d'un seul boson de Higgs, mais d'une famille de quatre particules ou plus. Si elles existent et sont plus légères que le quark *top*, certaines de ces particules pourraient résulter des désintégrations des quarks *top*. Les équipes CDF et DØ cherchent ces particules hypothétiques, mais elles ne les ont pas trouvés.

Nous étudions une autre question fondamentale : les quarks sont-ils vraiment des particules élémentaires, sans constituants ? L'équipe CDF a récemment mesuré plus de jets de haute énergie qu'on n'en prévoyait. Au début du siècle, Ernest Rutherford révéla la présence des noyaux au sein des atomes par une diffusion des électrons à grand angle. De manière analogue, l'excès de jets énergétiques pourrait résulter de collisions entre des constituants des quarks plus petits qu'eux.

On ne retiendra cette conclusion que lorsqu'on aura éliminé toutes les autres possibilités. Notamment, on doit d'abord vérifier que la production

«excessive» de jets ne résulte pas de petites erreurs de prédiction. Nous étudions les différentes possibilités, et les données actuelles favorisent l'une de ces explications moins spectaculaires. Pour l'instant, nous devons conclure que le quark *top*, malgré sa masse importante, est dépourvu de sous-structure.

Tandis que le Laboratoire Fermi rénove son accélérateur, les équipes CDF et DØ améliorent considérablement leur détecteur. Nous recommencerons à étudier des collisions en 1999. L'accélérateur modifié produira 20 fois plus de quarks *top* que précédemment, et les détecteurs les identifieront avec plus d'efficacité. Les deux groupes trouveront ainsi des quarks *top* 30 fois plus vite que par le passé, ce qui permettra

d'examiner plus en détail les caractéristiques de ce quark. En 2005, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN entrera en service. Il produira deux faisceaux de protons se heurtant à 14 TeV (téra, ou 10^{12} , électronvolts), soit sept fois l'énergie du collisionneur du Laboratoire Fermi, engendrant presque une paire de quark-antiquark *top* par seconde.

Ainsi, dans quelques années, les physiciens utiliseront le quark *top* pour étudier les nombreuses questions en suspens sur la matière et les forces qui gouvernent le monde physique. Quelles nouvelles lois physiques émergeront au-delà de ce que nous connaissons aujourd'hui ?

Tony LISS est physicien à l'Université de l'Illinois. Paul TIPTON travaille à l'Université de Rochester. Ils ont tous deux participé à la construction du détecteur CDF, au Laboratoire Fermi.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

F. ABE et al., *Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2626-2631, 3 avril 1995.

S. ABACHI et al., *Observation of the Top Quark*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2632-2637, 3 avril 1995.

Chris QUIGG, *Top-Ology*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 20-26, mai 1997.

3. PRÈS D'UN MILLIER DE PHYSICIENS et de très nombreux techniciens ont utilisé les détecteurs CDF et DØ pour découvrir le quark top. Les premières pages de leurs articles relatifs à la découverte ne contiennent que des noms.

L'archéologie à distance

FAROUK EL-BAZ

Les techniques de télédétection transforment le travail des archéologues, qui n'ont plus à creuser la terre pour comprendre le passé.

Rub'al-Khali, le «Quartier vide» d'Arabie, est un désert de plus de 770 000 kilomètres carrés. Les légendes rapportent qu'il était jadis plus accueillant : n'y avait-il pas la cité d'Ubar, une oasis située le long de la route de l'encens et que le Coran nomme la «Ville des Colonnnes»? Thomas Lawrence lui-même, mieux connu sous le nom de Lawrence d'Arabie, a cherché, sans succès, cette «Atlantide des sables».

Où chercher Ubar? Récemment, la navette spatiale et des satellites *Landsat* ont détecté de fines lignes qui convergent en un point niché au sein des dunes. Ce point de convergence était-il un cimetière ou une ville? Des expéditions ont été organisées en 1990 et 1991, et des fouilles effectuées le long d'une route ont mis au jour la structure d'une ville fortifiée, enfouie depuis des siècles.

De l'autre côté de la planète, dans le désert du Nouveau-Mexique, la télédétection par radar de sondage terrestre a révélé l'existence d'autres vestiges, bien plus anciens. Les réflexions d'ondes radar émises dans le sol révèlent les différentes couches de terre et de roche, et même des restes de dinosaures. Des paléontologues ont ainsi dégagé des fossiles de sismosaures, dinosaures herbivores qui faisaient trembler le sol lorsqu'ils se déplaçaient.

Dans l'espace ou au sol, les instruments de télédétection sont de plus en plus utilisés par les archéologues. À l'aide de radars, de magnétomètres ou de sismomètres, ces derniers localisent plus facilement les sites à fouiller, et ils les explorent de près sans les détruire. La pelle et la pioche sont progressivement remplacées par le radar, le magnétomètre ou le sismomètre, d'un maniement plus raffiné.

Bien que des aviateurs prennent des photographies depuis le début du ^{xx}e siècle, la télédétection n'est appliquée à la Terre que depuis 1968 : lorsque

les astronautes d'*Apollo* envoient les premières images de notre planète prises de la Lune, le public abasourdi contemple la sphère bleue sur le fond noir du vide spatial. Plus tard, des astronautes en orbite autour de la Terre aperçoivent la Grande Muraille de Chine, qui court dans les montagnes chinoises, et la Grande Pyramide, qui surplombe le plateau de Gizeh, à l'Ouest du Nil.

Des ressources agricoles à l'archéologie

En 1972, la NASA lance le premier satellite *Landsat*, d'observation et d'étude des régions agricoles. L'intensité du rayonnement infrarouge réfléchi par la végétation permet la prévision du rendement des récoltes (les plantes ont un fort pic d'émission dans l'infrarouge) : plus la récolte de blé est abondante, plus la réflexion correspondante est forte. Progressivement, des géographes, des géologues et des archéologues s'intéressent à ces images. À la fin des années 1970, des archéologues utilisent les satellites *Landsat* pour localiser des ruines Maya dans la jungle dense de la péninsule du Yucatán et d'anciennes constructions dans les plaines de Mésopotamie.

Puis, dans les années 1980, Thomas Sever, de la NASA, et Payson Sheets, de l'Université du Colorado, installent des caméras à infrarouge sur des avions : les photographies prises à basse altitude sont plus précises que celles fournies par les satellites. Dans la région de Tilarán, au Nord-Ouest du Costa Rica, ils observent une ligne bizarre et sinueuse. Sur certaines images, cette marque traversait en ligne droite les collines et les vallées : des fouilles de terrain confirment que ce sont des sentiers, tracés il y a 1 000 à 2 000 ans, qui relient des cimetières, des villages et des carrières.

Des routes anciennes sont aussi détectables par satellite, comme le prouve l'exemple d'Ubar, mais les détails

révélés par les photographies aériennes sont plus précis : T. Sever et P. Sheets ont facilement trouvé l'emplacement exact des pistes qu'ils cherchaient. La même équipe a découvert, dans le canyon du Chaco, au Nouveau-Mexique, d'autres routes préhistoriques qui prouvent que la civilisation Chaco faisait partie d'un vaste réseau commercial.

En 1986, le Centre national d'études spatiales améliora notablement les outils de la télédétection grâce au satellite *SPOT*. Celui-ci produit des images multibandes, en observant simultanément et séparément dans le vert, l'orange-rouge et l'infrarouge proche. Sur ces images, les plus petits détails ont 20 mètres de côté. Un autre mode d'observation est possible, avec des capteurs sensibles à toutes les longueurs d'onde de la lumière visible : on obtient des images en noir et blanc, dont la résolution est abaissée à dix mètres (les trois premiers satellites *Landsat* avaient une précision inférieure à 80 mètres, et les deux suivants de 30 mètres). Les images de *SPOT* ne sont pas aussi précises que les photographies aériennes, mais elles couvrent des zones plus vastes, ce qui permet d'étudier une région entière. James Wiseman et ses collègues, de l'Université de Boston, ont utilisé des photographies *SPOT* du Nord-Ouest de la Grèce pour retracer l'ancienne ligne littorale de la baie d'Ammoudhia, qui abritait un port important : ils ont cartographié les anciens chenaux et les bras de mer.

L'imagerie radar spatiale est un autre outil remarquable pour l'archéologie. Elle a été mise en œuvre pour la première fois lors du vol inaugural

1. CETTE IMAGE RADAR de la péninsule arabe révèle d'anciennes pistes, invisibles du sol. Leur point de convergence serait la cité perdue d'Ubar. L'image, qui couvre une surface de plus 50 kilomètres sur 80, a été prise en 1994 de la navette spatiale *Endeavour*.