

particules rapides la trajectoire qui leur est dévolue dans le tunnel, les ingénieurs devront produire des champs magnétiques plus intenses que tous ceux qui ont été appliqués jusqu'à ce jour. Ces champs seront produits par 1 232 aimants de 15 mètres de long chacun, occupant 85 pour cent de la longueur de l'accélérateur. Des câbles supraconducteurs, refroidis par de l'hélium superfluide, à la température de deux kelvins (deux degrés au-dessus du zéro absolu, soit $-271,15^{\circ}\text{C}$), transporteront les 12 000 ampères nécessaires à l'alimentation des aimants.

On n'observera pas de phénomènes physiques nouveaux si l'on se contente d'accélérer quelques protons, car leur énergie se répartit au hasard entre leurs constituants, les quarks et les gluons. Pour observer les rares collisions frontales de quarks, on devra augmenter considérablement l'intensité des faisceaux de protons. L'intensité produite par le LHC, ce que l'on nomme sa «luminosité», sera 100 fois supérieure à celle du Tevatron. La luminosité supérieure du LHC augmentera la difficulté des expériences, car les grandes intensités de faisceau défocalisent les protons.

Un milliard de collisions par seconde seront produites en quatre endroits du LHC ; chacune engendrera une centaine de particules secondaires. De gigantesques détecteurs – le plus grand est haut comme un immeuble de six étages –, assemblages de milliers de composants, suivront à la trace toutes ces particules secondaires. Des programmes d'ordinateur élaborés cribleront toutes les données, afin de sélectionner les quelques événements (de 10 à 100 par seconde) qui devront être mieux analysés.

Des questions sans réponse

Sonder la nature à de hautes énergies, c'est explorer la structure fine de la matière : les gigantesques accélérateurs de particules sont, en fait, des microscopes très puissants. Les accélérateurs actuels ont sondé la matière à l'échelle du milliardième de milliardième de mètre (10^{-18} mètre). Avec le LHC, on verra des structures dix fois plus petites. Cette avancée seule intéresserait déjà les physiciens, mais ceux-ci sont surtout impatients d'accéder à des domaines nouveaux de la physique.

Lors des 30 dernières années, les physiciens des particules ont élaboré une représentation concise de la réalité, qui décrit correctement la matière jusqu'aux échelles de 10^{-18} mètre : ce «Modèle standard» (voir l'encadré de la page 79) décrit les caractéristiques des particules connues, ainsi que trois des quatre forces qui s'exercent entre les particules. La matière est formée à partir de six quarks et de six leptons distincts. L'interaction «forte» lie les quarks en particules nommées hadrons, tels le proton et le neutron, et un effet résiduel de cette interaction forte regroupe les hadrons dans les noyaux atomiques. Les deux autres types de forces sont les interactions électromagnétique et faible. Cette dernière s'exerce seulement à très courte portée ; elle est responsable de la désintégration bêta et joue ainsi un rôle essentiel dans le fonctionnement des étoiles et, notamment, du Soleil. Le Modèle standard donne une description unifiée des interactions faible et électromagnétique, sous la forme d'une interaction «électrofaible».

Plus de 20 physiciens qui ont contribué à l'élaboration du Modèle standard ont été récompensés par le prix Nobel. Cependant, le Modèle standard présente des insuffisances. Tout



Laurent Guiraud, CERN

2. LE TRONÇON D'ESSAI d'un aimant supraconducteur a été réalisé dans le hall d'assemblage ; 1 232 aimants de ce type dévieront les deux faisceaux de protons accélérés par le LHC et leur feront suivre une trajectoire circulaire dans le tunnel de l'accélérateur.

d'abord, s'il décrit les phénomènes observés avec une précision parfois extraordinaire, il n'intègre pas la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui relie les forces de gravitation et les déformations de l'espace-temps. Or la relativité, également bien confirmée expérimentalement, est une bonne description de la quatrième force de la nature : la gravitation. Le Modèle standard est une théorie purement quantique, ce qui n'est pas le cas de la relativité générale, et les deux théories ne devraient se rejoindre qu'à des échelles bien inférieures à celles qui sont accessibles expérimentalement. En l'absence d'une description quantique de la gravitation, le Modèle standard demeure incomplet.

De surcroît, malgré sa simplicité et sa puissance, le Modèle standard présente de nombreuses particularités qui semblent arbitraires. Les physiciens pensent qu'il est trop «baroque» et trop «byzantin» pour être la représentation complète de l'Univers. Il n'explique pas pourquoi le nombre de quarks et de leptons est égal à six, ni pourquoi ces deux nombres sont égaux : est-ce une coïncidence ? Les physiciens ont élaboré diverses théories qui lient intimement les quarks et les leptons, mais aucune expérience n'indique encore quelle théorie est préférable.

Troisièmement, le test expérimental du Modèle standard n'est pas achevé, et les prévisions invérifiées sont capitales : elles concernent le mécanisme qui donne leur masse aux particules. La masse est un paramètre crucial : si l'on changeait celle de l'électron, par exemple, toute la chimie serait bouleversée ; la masse des neutrinos, elle, détermine l'expansion de l'Univers (la masse des neutrinos est inférieure à quelques millièmes de la masse de l'électron, mais des expériences récentes indiquent qu'elle n'est pas tout à fait nulle).

Le mécanisme de Higgs

Les physiciens pensent que la masse de chaque particule est engendrée par des interactions avec un champ qui emplit tout l'espace : plus cette interaction est forte, plus la masse est élevée (voir l'encadré de la page 79). Cependant la nature exacte de ce champ reste inconnue. Soit c'est un nouveau champ élémentaire, nommé «champ de Higgs» (d'après le nom du physicien britannique Peter Higgs) ; soit il correspond à un ensemble de

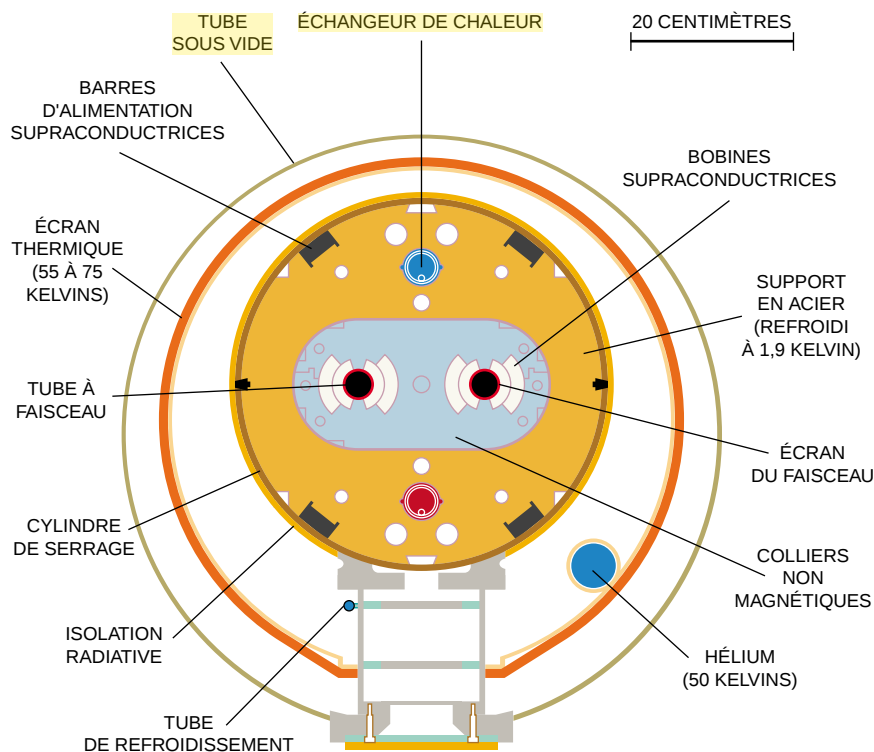
particules, les «techniquarks», associées à une interaction nouvelle, la «technicouleur». Même la théorie de Higgs admet des variantes : il pourrait exister plusieurs champs de Higgs, dont on ignore les propriétés.

Néanmoins, les physiciens ont une certitude quasi absolue : quel que soit le mécanisme réel, il produira de nouveaux phénomènes aux énergies qui seront communiquées aux particules par le LHC ; par exemple, on espère l'apparition des particules de Higgs (qui correspondraient à des ondes dans le champ de Higgs) ou la découverte des «techniparticules».

Avec le LHC, les physiciens testeront également les théories qui étendent ou qui complètent le Modèle standard. Ainsi, une théorie complète doit probablement être «supersymétrique» : les relations entre les particules et les interactions seraient considérablement resserrées. En outre, la «supersymétrie locale» inclurait la gravitation ; inversement, la théorie des cordes, la seule qui unifie la mécanique quantique et la relativité générale, est supersymétrique. De ce fait, si la supersymétrie s'applique effectivement, les physiciens espèrent que le LHC révélera les particules qu'elle prédit.

Les phénomènes et particules attendus pourraient arriver avant la mise en fonctionnement du LHC, car on augmente aujourd'hui l'énergie du LEP à plus de 100 giga-électronvolts, et, en 2001, le Tevatron projettera des protons contre des antiprotons, après une remise à niveau qui s'est achevée en 1999 (aujourd'hui, le Fermilab explore d'autres domaines de la physique en projetant ses protons sur des cibles fixes). Un de ces accélérateurs devancera-t-il le LHC ? C'est possible, mais il ne pourrait que montrer la partie émergée d'un iceberg que seul le LHC explorera.

Si le LEP et le Tevatron ne détectent aucun phénomène nouveau, le LHC donnera des indications inédites à des échelles inexplorées : il permet d'étudier tous les phénomènes qu'explorent les accélérateurs actuels, avec un systématisme qui ne laisse pas de zones d'ombre. De surcroît, les mesures faites depuis sept ans au LEP, à l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) et au Fermilab ont certifié que le LHC détectera le boson de Higgs s'il existe. Avec le LHC, les physiciens seront fixés : soit on découvrira le boson de Higgs, soit on trouvera un autre mécanisme qui expliquera la masse des particules.



3. UN DES AIMANTS DE L'ACCÉLÉRATEUR du LHC est représenté ici en coupe transversale. Les bobinages supraconducteurs seront parcourus par un courant de 12 000 ampères et ils seront refroidis à une température inférieure à deux kelvins (-271,15 °C). Chaque tube à faisceau sera parcouru par un faisceau de protons. D'autres aimants focaliseront les faisceaux et les dévieront dans les zones de collision, au centre des détecteurs.